

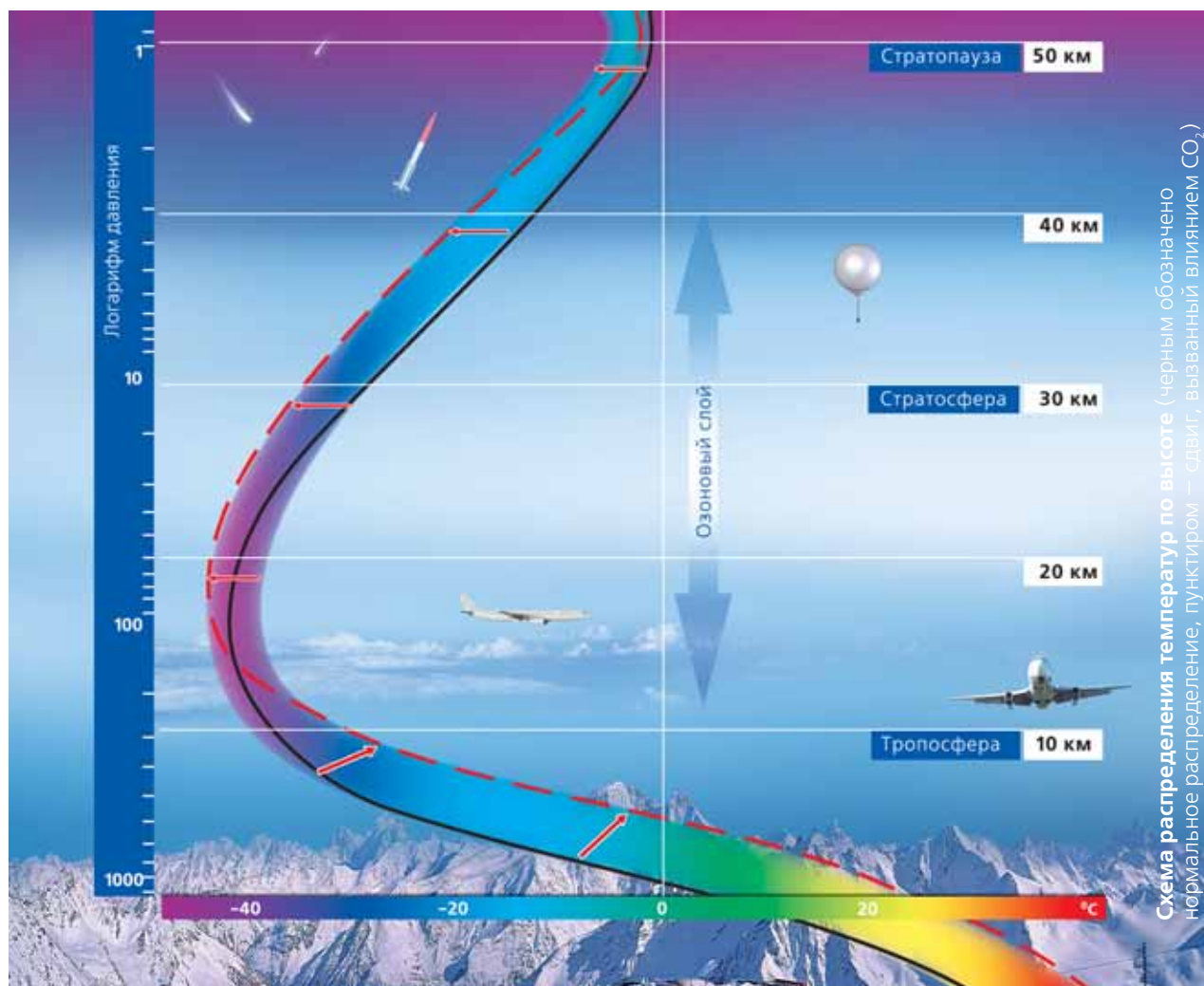
Глобальный и локальный подходы к проблеме климата

А.Л. Самсонов

главный редактор журнала «Экология и жизнь»

К нынешнему Международному дню окружающей среды мы приурочим разговор о климате. Эта тема находится в центре международных дебатов, кульминация которых пришлось на декабрь прошлого года, когда международное сообщество собралось в Копенгагене обсудить неотложные действия по предотвращению негативных последствий изменения климата. Прозвучало множество мнений, среди которых были и голоса скептиков, которые говорили, что проблема политически преувеличена, и голоса борцов против изменения климата, требующих беспрецедентных усилий по его сохранению.

Попробуем сконцентрировать наши знания о климате, чтобы выяснить, решение каких задач в этом направлении можно ставить на повестку дня.



Можно ли повлиять на климат?

Из того факта, что первобытные люди жили в пещерах, можно сделать вывод, что создание индивидуального климатического комфорта — предмет извечной заботы человека. Он учился у зверей, которые роют норы, устраивают берлоги, и у птиц, которые выют гнезда, и у насекомых, которые строят «города», и сам строил разнообразные типы жилья. Жилье — это уголок пространства, где царит искусственный микроклимат. Это пространство дает человеку уют и защищенность, позволяет хранить запасы. Однако человек ведет общественный вид существования, поэтому для минимизации времени обмена услугами, продуктами, инструментами и информацией жилища объединяются в города и поселки, по сути создавая искусственный ландшафт местности.

Все поселения создаются в расчете на стабильность окружающей среды и с учетом климата, который предполагается постоянным. Города — это наиболее защищенные от капризов стихии цитадели человечества, но и города гибнут, и не только исторические Помпеи, но и современные — как было с Новым Орлеаном, полумиллионным городом, практически разрушенным ураганом Катрина в августе 2005 года.

Заинтересованность общества в стабильности климата очень велика — на это завязаны жизненно важные параметры существования городов и поселков, хозяйственная деятельность и транспорт. Поэтому система предотвращения климатических рисков — вполне реальная проблематика в самых различных областях деятельности человека. Однако есть у человечества и давняя мечта — стремление повелевать стихиями. Возможно ли это?

Вспомним спор по поводу допустимости ограниченного ядерного конфликта. В начале 1980-х годов возникло представление о том, что ядерный конфликт ведет к «ядерной зиме» — явлению, при котором земная поверхность остывает, так как лучи солнца отражаются пылью, поднятой с земной поверхности, и поглощаются сажей от возникших пожаров. Однако противники этой точки зрения приводят аргумент — за время ядерных испытаний (до их полного запрещения) взорвано почти 2000 зарядов различной мощности, но никакой «зимы» не наступило — из чего делается вывод, что ограниченная ядерная война возможна. Вывод, конечно же, неверен — эскалация насилия в войне неизбежна, поэтому удары будут произведены одновременно, а фактор времени полностью меняет картину. Тем более что испытания проводились,

как правило, в местах, где длительные пожары невозможны, и на скальных грунтах, где мало пыли. В войне же все наоборот, поэтому апокалипсис в ядерном конфликте практически неизбежен.

Тем не менее из этого спора вытекает, казалось бы, логичный вопрос: а нельзя ли создать немного «зимы» искусственно, управляемо, чтобы слегка охладить Землю? Этот вопрос имеет под собой вполне определенное реальное основание — история крупных извержений вулканов, после которых был зафиксирован эффект продолжительного похолодания. Например, у отличившегося недавно вулкана Эйяфьятлайокудль есть «родственница» — вулканическая расселина Лаки в Исландии, из которой летом 1783 г. было выброшено гигантское количество пепла и газов — серо- и фтороводорода, погубивших почти весь исландский скот. Последствия этого извержения описывал Бенджамин Франклин, который был в это время послом во Франции. Над Европой и над большей частью Северной Америки висел необычный «сухой» туман, представлявший собой аэрозоль, выброшенную на высоты более 10 км — за пределы тропопавзы*, где она могла бы быть смыта дождями.

По некоторым оценкам, количество двуокиси серы (SO₂), высвобожденное при этом извержении, составляло около 90 млн т, что соответствует 120 млн т аэрозоля серной кислоты (H₂SO₄). Это примерный эквивалент современного среднегодового промышленного загрязнения, за исключением того, что весь выброс был сосредоточен практически в одной точке и благодаря мощной подъемной силе нагретого извержением воздуха «пробил» приземный слой атмосферы и развеялся в стратосфере. Четкие следы повышенного содержания двуокиси серы в окружающей среде можно обнаружить в ледниковых шапках Гренландии, где сохраняются ежегодные слои. Однако последствия извержения Лаки не были однозначными тем летом — во Франции было холодно, а в Англии, наоборот, очень жарко, т. е. произошло лишь локальное перераспределение тепла в Европе. В то же время планетарный эффект извержения аэрозоля в стратосферу оказался вполне однозначным — зима 1783/1784 года была холодной во всем Северном полушарии и особенно суровой на востоке США и в Японии. Судя по всему, наиболее

* Тропопауза — слой атмосферы, разделяющий тропосферу (приземный слой) и стратосферу. Отличается постоянством температуры по высоте (–53 °С) и расположен на высотах 10–20 км при давлении 0,1 атм.; именно в этом слое проходят полеты пассажирских самолетов.



масштабным и долговременным последствием извержения было остывание нижних слоев атмосферы в Северном полушарии из-за отражения солнечного света аэрозолями серной кислоты. На локальном уровне последствия извержения Лаки сказывались еще несколько лет и стали невероятно разрушительны в социальном плане, так как вызвали неурожаи и голод. Во Франции появились десятки тысяч нищих — итогом стала, как известно, Великая Французская революция 1789 г.

Другой пример — извержение вулкана Тамбора весной 1815 г. на индонезийском острове Сумбава. В результате мощного извержения образовалась колонна выбросов высотой 33 км, а повторный «залп» поднялся на 44 км, т. е. достиг границы стратосферы, стратопаузы. Не менее 80 млн т двуокиси серы было выброшено в стратосферу (выброс аэрозоля был примерно таким же, как у Лаки). Стратосферные аэрозоли серной кислоты были причиной необыкновенно холодного лета в Северном полушарии в следующем, 1816 г., который вошел в историю как «год без лета». Во всем мире среднегодовая температура упала на 0,4–0,7°, но на востоке Северной Америки и в Западной Европе понижение было вдвое большим. «Сухие

туманы», такие же, как последовавшие за трещинным извержением Лаки 1783 г. в Исландии, были отмечены в Америке, а в ледниковых слоях Гренландии и Антарктики наблюдается четкий пик кислотности.

Интересно, что разгром Наполеона под Ватерлоо летом 1815 г. историки связывают с проливным дождем накануне битвы, затруднившим подход армии Нея. Однако однозначно связать этот дождь с извержением Тамборы, как это сделано в отношении холодного лета 1816 г., невозможно. Но проливные дожди и холодное начало лета наблюдаются в Европе и в 2010 г. — после извержения вулкана Эйяфьятлайокудль. После холодной и необыкновенно снежной зимы надо было бы ожидать ранней и сухой весны, поскольку годовая норма осадков — величина постоянная в любом климате. Однако погода в Европе отклоняется от этой нормы, что заставляет подозревать ее, как и все Северо-Атлантическое колебание*, в «вулканозависимости». Это вполне реально, например, за счет локального разогрева атмосферы в Исландии при извержении вулкана меняется размах «качелей давления».

Более однозначен вывод о влиянии извержений на долгосрочное охлаждение поверхности, который имеет ту же природу, что и эффект «ядерной зимы» в результате ядерного конфликта.

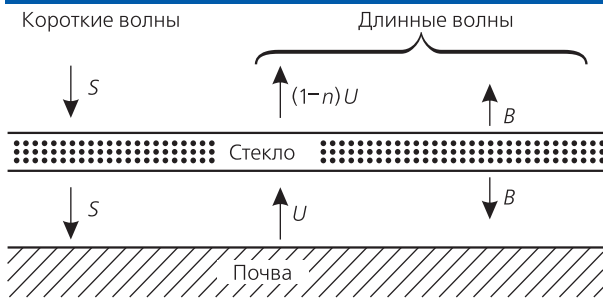
Однако предложение имитации вулканической «зимы» посредством дозированного выброса в атмосферу аэрозоля серы** неприемлемо для борьбы с глобальным потеплением ни в какой форме. Дело в том, что такое воздействие нельзя считать контролируемым, а это главный критерий управления! Где и как выпадет серный аэрозоль, сколько времени он будет действовать, никто не знает. Неуправляемое воздействие на атмосферу скорее вызовет последствия, близкие к ядерному конфликту, чем принесет пользу человечеству.

Значит ли это, что человечество должно избрать стратегию «невмешательства» в климат? Возможно ли это при существующем положении дел? И наконец, наиболее принципиальный вопрос: если человек должен взять на себя ответственность за судьбу биосферы, как предсказывал В.И. Вернадский, значит ли это, что ответственность будет заключаться в отказе от регулирования факторов

* Северо-Атлантическое колебание — это «качели давления» между зоной высокого давления над теплыми водами в Атлантике и зоной низкого давления в Исландии.

** См. Мелешко В.П., Катцов В.М., Кароль И.Л. Опасный коллапс. Воздействие на климат в борьбе с глобальным потеплением/ Экология и жизнь, № 2'2010, с. 44–51.

Рис. 1. Формирование парникового эффекта



Поместим над почвой полупрозрачный слой, например стекло. Как правило, стекло прозрачно для радиации с длинами волн меньше 4 мкм, но частично поглощает радиацию с большими длинами волн. Предположим, что стекло и почва вначале имеют одну и ту же температуру, затем «включается» сверху поток S солнечной радиации, которая на 99% состоит из волн длиной меньше 4 мкм, так как максимум интенсивности этого излучения (планковский максимум) отвечает температуре поверхности Солнца — около 6000 К, что соответствует максимуму в зеленой области 0,5 мкм. Эта величина находится по формуле Вина $\lambda_{\text{макс}} T = 3000 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ при подстановке $T = 6000 \text{ К}$.

Излучение этой длины волны пройдет через стекло неослабленным и обеспечит нагрев почвы. Почва нагреется до температуры T_g , после чего будет испускать вверх поток длинноволновой радиации U , связанный с температурой почвы законом Стефана—Больцмана

$$U = \varepsilon \sigma T^4, \quad (1)$$

где ε — коэффициент излучения или, что то же самое, степень черноты поверхности почвы, примем для простоты $\varepsilon = 1$, σ — постоянная Стефана—Больцмана.

Максимум этого излучения, в отличие от излучения Солнца, лежит как раз в области поглощения стекла или подобной ему по поглощению атмосферы (это длины волн более 4 мкм, например для $T = 300 \text{ К}$ (или $+27 \text{ }^\circ\text{C}$) по формуле Вина найдем $\lambda_{\text{макс}} = 10 \text{ мкм}$), поэтому излучение почвы не пройдет через него беспрепятственно. Практически вся радиация, излучаемая при температуре около 300 К, характерной для почвы, имеет длины волн свыше 4 мкм (в диапазоне

4–100 мкм), и большая часть этой радиации будет поглощаться стеклом. Вследствие этого стекло нагреется и само станет источником теплового излучения. Когда установится равновесие, излучение стекла будет одинаково в обоих направлениях.

Пусть этот поток равен B . Запишем первое условие равновесия:

$$S = U(1 - n) + B, \quad (2)$$

которое выражает баланс потоков на верхней поверхности стекла, где поток излучения S , падающий на стекло сверху, в равновесии должен быть равен сумме потоков, направленных вверх (потока излучения почвы U , ослабленного стеклом до величины $U(1 - n)$, где n — коэффициент поглощения, и потока B излучения самого стекла вверх). Но в равновесии такой же поток тепла B идет вниз — от стекла к почве, при этом в силу разной направленности потоки лучей от почвы и в почву вычитаются, а разность должна быть равна падающему потоку. Потоки здесь работают вдоль одной прямой, т. е. последовательно, а при последовательном включении поток тепла (так же, как и ток в электрической цепи!) во всей цепи одинаков, что позволяет нам записать второе уравнение:

$$S = U - B \quad (3)$$

Очень важно то, что, согласно уравнению (3), температура внизу (на почве) должна быть больше, чем наверху (на стекле), так как разность потоков по закону (1) легко представить как разность температур в четвертой степени.

Таким образом, получаем два уравнения, из которых, исключая B , находим:

$$S = U(1 - n/2)$$

Величина U определяет самую высокую в системе температуру, отвечающую почве:

$$T = \sqrt[4]{\frac{S}{\sigma(1 - n/2)}}$$

Из этого выражения можно найти отношение температур при наличии стекла и без него — разница составляет примерно 19%, т. е. температура под стеклом примерно на 19% выше, чем она была бы в отсутствие стекла, когда $n = 0$.

возможных климатических катастроф? Очевидно, что масштабы могущества человека уже достигли уровня, при котором он может имитировать стихийные воздействия — такие как извержения вулканов. Но вопрос управления и ответственности заключен совсем не в том, чтобы создавать бедствия, а наоборот — в умении предотвращать их.

Парниковый эффект

Парниковый эффект за счет наличия в тропосфере Земли парниковых газов (прежде всего паров воды) может дать увеличение температуры примерно на 19% (см. рис. 1). Но почему тогда на Земле после вулканических извержений становилось холоднее? На чем основан эффект «ядерной зимы»? И что дают пресловутые выбросы CO_2 ?



Чтобы ответить на эти вопросы, рассмотрим график, составленный по данным фактических съемок Земли из космоса (рис. 2). На нем показаны фактические величины и распределение потоков падающей на Землю и излучаемой Землей радиации.

Предположим, что на Земле нет атмосферы вообще. Тогда наибольшую возможную температуру поверхности можно рассчитать через поток падающей радиации в предположении, что степень черноты $\epsilon = 1$.

Поскольку, по данным графика, величина потока на Северном полюсе равна примерно 50 Вт/м^2 , по формуле Стефана–Больцмана (1) находим $T = -170 \text{ К}$ (или примерно $-100 \text{ }^\circ\text{С}$). Температура на экваторе окажется равной 270 К ($0 \text{ }^\circ\text{С}$), а на Южном полюсе -150 К ($-120 \text{ }^\circ\text{С}$). Такой климат теплым не назовешь.

Однако реальные температуры на Земле примерно на 50 градусов выше. Это и есть вклад атмосферы (и океана) в формирование климата на планете. Если мы найдем 19% от полученной на экваторе величины 270 К , то это и будет как раз 51 градус. Однако все не так просто, как хотелось бы. Климатическая система представляет собой некую тепловую машину, работающую в определенном замкнутом цикле, а не стационарный парник.

Главную роль в формировании климата играет соотношение потоков приходящей и уходящей обратно в космос энергии. На внешней границе атмосферы поток «входящей» энергии наибольшей величины приходится на «планковский максимум»

Солнца — на коротких волнах около 0,5 мкм. Отраженная и рассеянная энергия излучается почвой и атмосферой с температурой около 300 К или ниже, поэтому максимум энергии приходится на длинные волны — 10 мкм и более. Принципиальное значение имеет пунктирная кривая, проходящая на уровне 100 Вт/м^2 — это излучение атмосферы, представляющее сумму излучения из объема атмосферы и поверхности Земли, вклад которых разделяется примерно поровну.

Работу климатической машины определяет разность приходящих и уходящих потоков. На рис. 2 эту разность можно оценить разбегом нижней сплошной линии и пунктира. Там, где сплошной график лежит выше, энергия потребляется, там, где наоборот, ниже, — отдается. Переход происходит на границе тропиков вблизи 30-й широты.*

Для тепловой машины принципиально необходимо наличие источника тепла (нагревателя) и стока тепла (холодильника). Значение падающей радиации, выполняющей роль нагревателя, как видно из графика, зависит от широты α как $S \sin \alpha$, т. е. определяется углом наклона площадки к падающему потоку, тогда как исходящий поток на всех широтах примерно одинаков.** Это означает, что происходит выравнивание теплового потока вдоль поверхности планеты. За счет чего?

Вновь взглянем на рис. 2. От экватора до 30-й широты падающий поток превышает исходящий, тогда как в более высоких широтах ситуация обратная. Соответственно тепло от Солнца «закачивается» в тропиках и «выкачивается» в космос в высоких широтах. Происходит это просто за счет того, что в зонах, где разность потоков положительна, атмосфера в целом нагревается и теплый воздух поднимается вверх, а затем устремляется к полюсам, чтобы освободить путь новым нагретым массам воздуха. Так формируются пассаты — ветры, дующие между тропиками круглый год. За счет вращения Земли в Северном полушарии пассаты дуют с северо-востока, в Южном — с юго-востока, отделяясь друг от друга безветренной полосой.

Конвективные ячейки (рис. 3), образуемые потоками теплого и холодного воздуха, в полосе между 30° с. ш. и 30° ю. ш. в каждом полушарии формируют два пассатных ветра: в Северном по-

* Это так называемые конские широты, получившие свое название из-за сухости воздуха (там часто не оставалось воды, чтобы поить лошадей). Это зона пустынь.

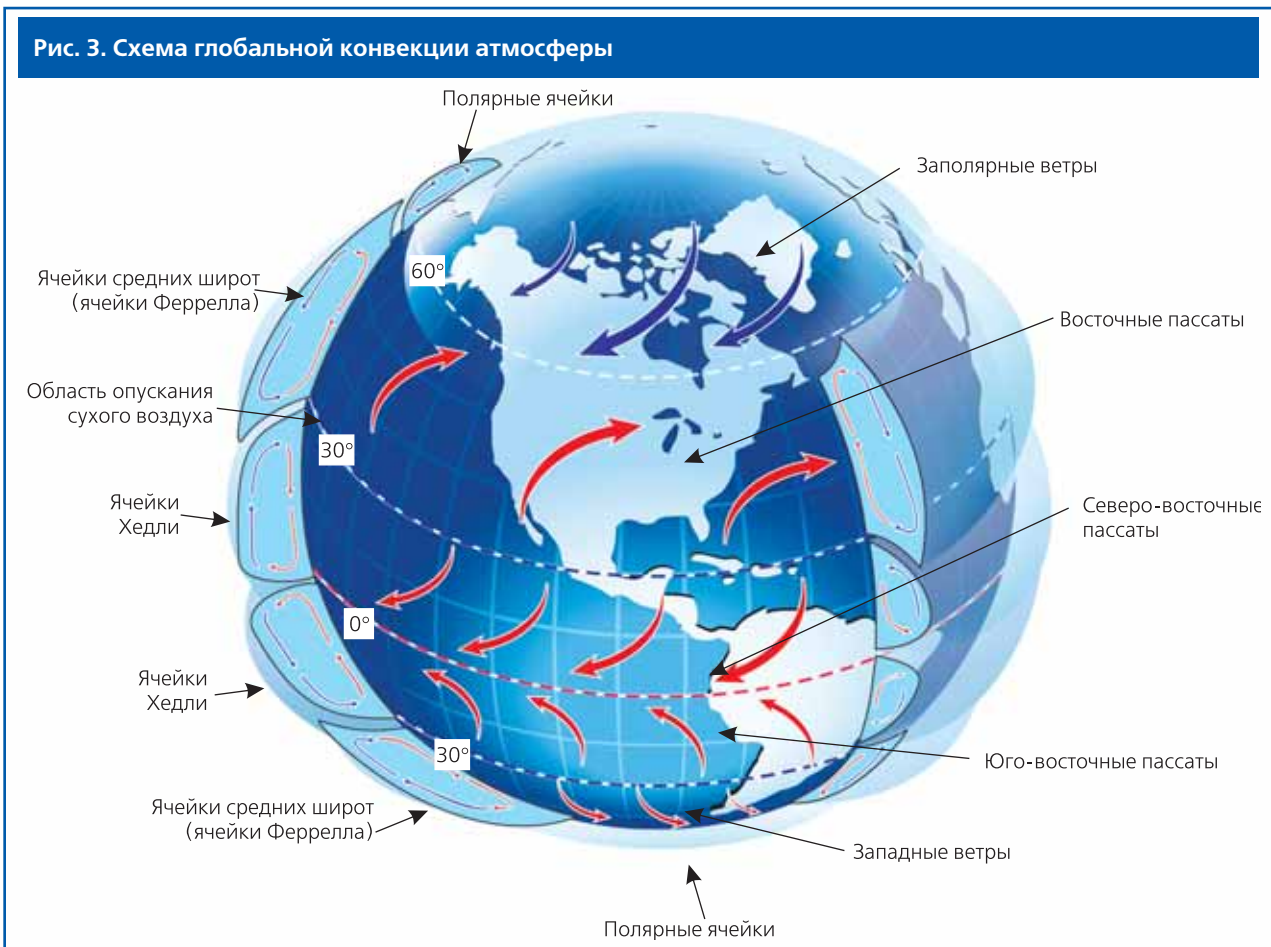
** Площадь земной сферы в 4 раза больше площади большого круга, на который падает поток от Солнца, поэтому $S = S_0/4$, где S_0 — солнечная постоянная, 1367 Вт/м^2 .

лушарии северо-восточный в тропиках и юго-западный в средних широтах, в Южном — соответственно к экватору дуют юго-восточные ветры, а в умеренной зоне — северо-западные.

Теперь мы можем ответить на вопрос, что произойдет, если солнечные лучи будут не в состоянии прогреть атмосферу после извержения вулкана или ядерного конфликта. Из-за рассеянных в стратосфере частиц они будут сразу отражаться в космос на уровне стратосферы, а проходящего потока будет недостаточно, чтобы поддерживать пассаты в тропосфере! При этом высокие широты лишатся той добавки тепла и влаги, которую несут теплые ветры с экватора, и начнут интенсивно остывать — ведь поток падающей радиации с увеличением широты быстро стремится к нулю, как $\sin \alpha$. Таким образом, парниковый эффект на поверхности Земли практически «выключается», температура в высоких слоях атмосферы будет выше, чем на почве — это называется температурной инверсией, в этом случае радиационный поток не может иметь направление на поверхность, он станет диффузным, будет рассеиваться во все стороны. В то же время с точки зрения внешнего теплообмена Земля

будет вести себя так, как будто она полностью лишилась парникового эффекта, поскольку не выполнено условие (3). Температуры для этого случая мы уже считали выше — они примерно на 50 градусов ниже, чем те, которые установились благодаря парниковому эффекту. Именно эти температуры и определяют баланс рассеянной радиации внутри аэрозольного слоя. Можно утверждать, что они будут заведомо намного ниже тех, к которым привыкло все живое на Земле, а перепад температур между экватором и полюсом возрастет, так как выключен механизм перераспределения тепла — конвективный насос, создающий теплые пассаты.

Чтобы сделать наши выводы более наглядными, проведем эти же рассуждения, но для условий Венеры и Марса. Венера представляет собой глубокий слой облаков, ее альbedo вдвое выше, чем у Земли. Высокое альbedo означает, что Венера рассеивает в космос вдвое больше энергии чем Земля, но эта потеря компенсируется, поскольку и солнечная постоянная Венеры — $2613,9 \text{ Вт/м}^2$, почти вдвое больше чем у Земли — 1367 Вт/м^2 , при этом температура поверхности по закону Стефана должна вырасти на 18%. Однако почему тогда темпера-



тура поверхности Венеры в два раза превышает земную? Все дело в парниковом эффекте! Высокое альbedo Венеры означает, что поверхность планеты закрыта облаками — т. е. имеет намного более эффективную экранную изоляцию поверхности. Из бытовой практики известно, что экранирование позволяет лучше сохранить тепло. Расчет теплообмена на стр. 7 показывает эффект стекла как однослойной экранной изоляции поверхности, ведущей к повышению температуры на 19%. Если добавить еще один экран, то рост температуры составит 41%, третий повысит ее на 68%, 4-й — на 100%, что удвоит температуру поверхности, а 5-й на 138%, т.е. температура увеличится примерно в 2,4 раза! На поверхности Венеры, окруженной многослойным «одеялом» непрозрачных облаков, температура составляет в среднем 735 К. Усредненные температуры Земли между экватором и полюсами дает значение около 260 К. Добавим 18% (за счет роста солнечной постоянной) и умножим эту величину на 2,4 — получим 736,3 К. Таким образом, предположение о том, что облачный покров состоит из пяти экранирующих поверхность планеты слоев выглядит вполне правдоподобно. Атмосфера Венеры, хотя и состоит из чистого CO_2 , дает по всему спектру небольшое поглощение, неспособное объяснить высокую температуру поверхности. Таким образом Венера подогревается своей многослойной облачной шубой, которая эффективно усиливает парниковый эффект, подогревая поверхность планеты.

Такой подогрев приводит к развитой конвекции, которая становится мощной доминантой тепловых переносов — температура на планете выравнивается по всей поверхности, над ней постоянно бушуют ураганные ветры. Именно поэтому Венеру называют планетой бурь.

Марс имеет альbedo поверхности 0,15 (вдвое ниже, чем у Земли) и атмосферу, в среднем на 95% состоящую из парникового газа CO_2 , давление которого намного меньше атмосферного — 0,006 атм. Уменьшение альbedo и здесь означает не только то, что отражение меньше, но и говорит об отсутствии облаков, играющих роль ловушки для тепла. В атмосфере Марса возможны только пылевые облака, которые приближают условия на Марсе к модели «ядерной зимы», — они мало пропускают любое излучение, но сильно поглощают, поэтому формируется инверсный слой — температура растет с высотой, как и в стратосфере Земли. Но Марс лишен тропосферной климатической машины, потому и «остался» без парникового эф-

фекта, который она поддерживает. Низкое давление ведет и к малой теплоемкости атмосферы (возникают огромные перепады дневных (+30 °C) и ночных (–80 °C) температур на экваторе), а также к повышенной склонности к конденсации, из-за чего практически вся конденсация происходит прямо на поверхности и облака не образуются вообще (за исключением пылевых). Температура поверхности должна «недобирать» примерно 19%. В то же время солнечная постоянная на орбите Марса составляет 43% от солнечной постоянной на орбите Земли, что по закону Стефана определяет падение температуры на 10%. На основе температур Земли «без атмосферы» получим среднюю температуру марсианского экватора ~ 243 К (–30 °C), а для полюсов ~ –153 К (Северный) и ~ –135 К (Южный), что довольно близко к результатам наблюдений. На Марсе сухой лед из CO_2 образует шапки льда на полюсах, где температура достаточно низка. Особенностью этого льда является то, что он не плавится, а сразу переходит в пар при температуре 195 К.

Возгонку льда при атмосферном давлении видел каждый — это «дымок», идущий из лотка с мороженым. Однако на Марсе, где давление в 160 раз ниже, возгонка происходит гораздо интенсивнее — почти мгновенно, что определяет резкое, взрывное испарение, создающее пылевые облака. В течение дня вся планета может быть закрыта пылевой бурей.

Локальный климат

Мы рассмотрели, по сути, глобальные эффекты наличия или отсутствия парниковых свойств атмосферы планеты, определяющие «глобальный» климат — климат «в целом». Но когда появляются локальные конвективные ячейки и формируются отклонения направления ветров под действием вращения Земли, это приводит к локальным особенностям климата. Локально может меняться и облачный покров, а ведь все наши рассуждения о парниковом эффекте относились к последовательной схеме «включения» потоков. Однако если облачный покров рвется или влажность воздуха резко падает, то «эффект парника» вынужден конкурировать с параллельным процессом — сбросом тепла с поверхности прямо в космос. Такой поток «короткого замыкания» излучения в космос зависит от температуры почвы в 4-й степени, и чем почва горячее, тем сильнее поток. Поэтому в пустынях, где воздух сух (в нем нет паров воды, поглощающих ИК-излучение), ночи



так холодны — сброс тепла в космос там очень велик!

Большой сброс тепла в космос наблюдается и в самых холодных точках планеты, где влага из воздуха вымораживается. Так возникает самоподдерживающийся ледник — вымораживая воду, он получает возможность необыкновенно эффективно «сбросить» излишков тепла, возникающих, например, когда лед начинает немного нарастать (за счет замороженной воды). При этом выделяется теплота кристаллизации, которая обычно тормозит процесс. Но ледник при ясном небе эффективно сбрасывает это тепло прямо в космос, что позволяет ему расти, увеличивая глубину льда и растекаясь по окрестностям.

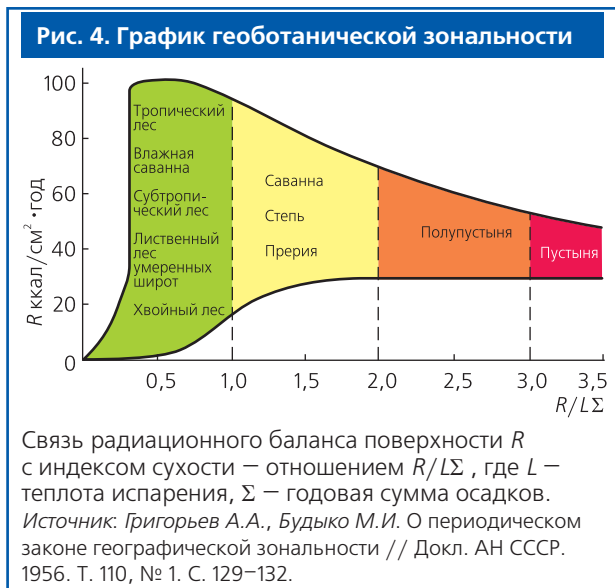
Любое «окошко» сухого безоблачного воздуха дает мощнейший «радиационный пробой» защитной экранировки поверхности Земли, где сброс тепла будет полностью определяться температурой в четвертой степени и площадью «атмосферного» окна. Эффект, о котором мы говорим (назовем его эффектом ледника), охлаждает поверхность и является конкурирующим процессом по отношению к эффекту парника. Нагреватель и холодильник тепловой машины в эффекте ледника имеют чисто радиационный «привод» и успешно работают в высоких широтах, где поток падающей солнечной радиации становится меньше, чем поток излучения с земли, где формируется ледник. Вечная мерзлота имеет выигранный в этом механизме: за счет высокой степени черноты покрывающей почвы поток излучения в космос достигает макси-

муму, и мерзлота действительно становится «вечной»!

Для работы парникового эффекта необходимо (см. уравнение 3), чтобы поток тепла из воздуха $B = U - S$ был положителен. Поэтому для устойчивой работы климатической машины, основанной на парниковом эффекте, необходим холодильник, охлаждающий слой газов над поверхностью, для того чтобы температура почвы была выше температуры атмосферы, выполняющей роль «стекла». Тропосферный холодильник работает за счет того, что по высоте тропосферы давление падает в 7–8 раз, что снижает и температуру конденсации паров воды — «точку росы». Температура конденсированной воды падает с высотой и снижает температуру воздуха, что создает вертикальный градиент $\text{град } T = 0,65^\circ/100 \text{ м}$. Конденсатором для влаги служат как облака в самой тропосфере, так и стратосфера, где вода существует в виде кристаллического аэрозоля. Поглощение коротковолнового излучения Солнца разогревает озоновый слой, расположенный в стратосфере. Судя по максимальной температуре слоя 0°C , процесс разогрева сдерживается плавлением взвешенного льда. В стратосфере наблюдается инверсия — температура растет с высотой от -50°C до нуля (см. схему в начале статьи). Если же в самой тропосфере возникнет инверсный слой, где температура выше, чем на поверхности, работа парниковой климатической машины останавливается. В области высоких широт это приводит к тому, что включается «эффект ледника», а в тропиках — к локальному перегреву, так как исчезает конвективный теплоноситель с поверхности.

Таким образом, суть климатических процессов — «битва» за лидерство между парниковыми и ледниковыми машинами, а сам климат — это хрупкое равновесие между ними. Можно сказать, что на Марсе «победила» климатическая машина, использующая именно ледниковый эффект, тогда как на Венере эффективно работает парниковый «двигатель». Мы тоже живем на планете «победившего» парникового эффекта, но это не значит, что эта глобальная победа отменила локальные единоборства. Кроме того, устойчивость равновесия, обеспечившего историческую победу парникового эффекта на Земле, в любой момент может сместиться в сторону «ледников», например, в условиях «ядерной зимы» или извержений вулканов.

Роль CO_2 заключена в том, что он может создать дополнительный парниковый эффект — увеличить коэффициент поглощения «стекла». Результатом



является уменьшение теплового потока $S(1-n)$, проходящего снизу вверх через «стекло» (тропосферу), так как возрастет n . Это приводит к разогреву тропосферы, где и происходит поглощение при одновременном охлаждении нижней стратосферы, для которой подогрев «снизу» становится меньше.

Именно такую структуру потепления представила МГЭИК* при подготовке 4-го доклада в 2007 г. Наблюдения свидетельствуют, что происходит сдвиг температурной кривой (на схеме в начале статьи видно: тропосфера подогревается, а нижняя стратосфера — остывает), именно это и служит проявлением эффекта глобального потепления, о котором предупреждают эксперты МГЭИК. В то же время при всей важности глобальных явлений все живое на планете очень хорошо понимает и чувствует роль локального климата — именно поэтому жизнь на поверхности нашей планеты обретает структурированный, зональный характер (см. рис. 4, который показывает, насколько явно экосистемы суши «отслеживают» связь потока солнечного излучения и влажности).

Климат лесной или степной зоны — уже определенная данность в ареале, но это «не приговор», экосистемы способны регулировать внутренние климатические условия для своих обитателей, приспособившись к особенностям рельефа. В мире широко распространена классификация климатов, предложенная русским ученым В. Кёппеном

* Всемирная метеорологическая организация (ВМО) и Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) учредили в 1988 г. Межправительственную группу экспертов по изменению климата, МГЭИК (IPCC). На сайте www.ipcc.ch можно выбрать русский язык для чтения отчетов.

(1846–1940). В ее основе лежат режим температуры и степень увлажнения. Согласно этой классификации выделяется 8 климатических поясов с 11 типами климата. Каждый тип имеет точные параметры значений температуры, количество зимних и летних осадков. Однако оказывается, что для формирования разных климатов вовсе не обязательны огромные территории! Хорошо известны примеры соседства самых разнообразных типов климата на очень небольших территориях, например, остров Гран Канария (Канарские острова) диаметром 50 км получил название «континента в миниатюре» — на крошечном острове можно насчитать 5 или 6 климатических зон. Известно, что могут различаться и локальные климаты соседних деревень или дачных поселков — над одним дождь идет чаще, а над другим, наоборот, не идет. В России такие места получили прозвище «лысая гора», потому что на ней ничего не растет — не хватает влаги.

Примеры корректировки локального климата лесными экосистемами также хорошо изучены. Деревья служат естественными насосами, поднимающими влагу из почвы, и постоянно создают над кроной леса облако водяного пара, который обеспечивает локальный парниковый эффект, создающий подогрев в области кроны. В то же время внизу под кроной царит прохлада, поскольку испарение воды кроной требует затрат энергии. В зеленой кроне леса большая часть воды испаряется, тогда как малая часть через цепь превращений в ходе фотосинтеза превращается в кислород.

Испарение воды лесом оказывает большое влияние на климат. Над лесом скорее образуются облака, а под покровом леса эффективно накапливается влага, необходимая для фотосинтеза, в то время как температура под сенью леса за счет теплоты, потребляемой при испарении воды, на 7–10 градусов ниже, чем на открытом пространстве.

Инженерия климата

Сегодня деятельность человека позволяет изменять локальные характеристики влажности или задымленности значительных территорий. Это влияние ирригационных систем в сельском хозяйстве и выбросы промышленных агломераций, это смог больших городов и запыленность территорий, превращенных человеком в пустыни.

Широко известен пример Лондона, славившегося своим «фирменным» смогом до тех пор, пока правительство не приняло решение о переводе



отопления в городе с угля на другие виды топлива, что резко снизило выбросы и позволило лондонцам практически избавиться от смога.

Другой пример — мокрые градирни, применяемые на тепловых станциях. Они создают целые облака пара, которые постоянно истекают из огромных труб ТЭС и создают условия для локального парникового эффекта на прилегающих территориях. Очевидно, чем больше мощность станции, тем больше облако пара, ей соответствующее. Таким образом, наибольшие облака пара принадлежат наиболее мощным (атомным) станциям, которые и без того по сути являются гигантскими паровыми машинами. Избыточное тепло, обусловленное достаточно низким значением КПД этих «машин», требуется снимать за счет водяного охлаждения — так и возникают влажные градирни, представляющие собой как бы «тропосферу в миниатюре». Но при этом локального изменения климата за счет облака пара не избежать.

Еще большее влияние на климат оказывает самая древняя — сельскохозяйственная — деятельность человека, изменяющая условия увлажнения на очень больших территориях. Распашка земель приводит к нарушению гидрологического режима почвы, изменению показателей увлажнения, а животноводство создает облака метана и углекислого газа, имеющие постоянную «пропуск», связанную с пастбищами и загонами для скота. Все это приводит к локальным нарушениям климата.

Таким образом, совершенно ясно, что локальный климат человек вполне в состоянии испортить своими руками. Но, конечно же, наиболее актуален совершенно иной вопрос: можно ли «сконструировать» локальный климат? Ведь эксперименты по разведению садов в пустынях и созданию оранжерей в холодных зонах продолжают всю человеческую историю! Существует и опыт создания гигантских «парниковых» курортов. Более того, промышленность и сельское хозяйство эффективно воздействуют в первую очередь именно на локальный климат.

Как правило, человеческая деятельность так же, как и деятельность биосферы, не поднимает газы в стратосферу (мы говорим о мирном времени). Взглянем с этой точки зрения на те самые «вулканические» газы, которые изменяли глобальный климат после мощных извержений. Эти газы могут «работать» не только в виде стратосферного аэрозоля, но и изменять климат в приземном слое, участвуя, например, в формировании кислотных дождей (главные кислотообразующие выбросы в атмосферу — диоксид серы SO_2 и оксиды азота — оксид азота NO , диоксид азота NO_2 и др.). Причем если природными источниками поступления диоксида серы в атмосферу являются вулканы и лесные пожары, то эти выбросы поднимаются к верхней границе тропосферы, так как сопровождаются мощным током горячего воздуха, транспортирующего их вверх. Деятельность же человека генерирует выбросы без теплового «подъемника», и этих выбросов очень много — в год около 100 млн т. Для сравнения: природные выбросы SO_2 в год равны примерно 20 млн т.

Сейчас, когда усилились споры о факторах глобального потепления, эти выбросы привлекли всеобщее внимание и желание учесть их в расчете глобальной климатической системы — возникло подозрение, что они выполняют роль охладителей по типу влияния вулканических выбросов. Мы же обратим внимание на другую сторону процесса — эти выбросы формируют в первую очередь локальный микроклимат вокруг фабрик и заводов.

И вот здесь мы наконец зададим наш главный вопрос: а надо ли так ожесточенно спорить о глобальном климате, если локальный климат нам гораздо ближе и, пожалуй, важнее глобального? Глобальные меры и глобальная ответственность по снижению выбросов углерода совершенно затмили тему локального управления климатом. Однако наше влияние на локальный климат гораздо больше зависит от нас самих — и это лучший аргумент для того, чтобы задача конкретных действий по управлению локальным климатом была поставлена. Локальный климат меняется при постройке гигантских плотин ГЭС и водохранилищ, при вырубке лесов и распашке земель — и все это делается прямо сейчас и без оглядки на климат. Надо взять в свои руки инструментарий климата и научиться корректировать его сознательно, вместо того чтобы обосновывать разрушение природы экономической необходимостью. Борьба за глобальный климат без оглядки на локальный напоминает жаркие споры об утопической идее миро-

вой революции, которые велись революционерами в начале XX века, — с отрицанием личной свободы и частной собственности. Однако именно эти понятия легли в основу демократических и экономических институтов современного общества. Эта аналогия подсказывает, что обществу будущего не избежать проблем согласования локальных климатических интересов, что со всей очевидностью показала встреча в Копенгагене. Общая больба с глобальным потеплением не снимает проблем локальной неравномерности!

Выше мы рассмотрели простую логику парниковых и ледниковых эффектов, формирующих глобальные климаты Земли, Венеры и Марса. Однако при кажущейся эффективности простых соображений, оказывается, для того чтобы получить точную количественную модель (модель РКТ — радиационно-конвективного теплопереноса, или даже РККТ — радиационно-кондуктивного и конвективного теплообмена), приходится брать в расчет очень много факторов. Поэтому глобальный климат пока остается сродни глобальной политике и глобальной экономике, которые не поддаются попыткам управления. В этом и заключается проблема устойчивого развития, недостижимого при нынешнем уровне знаний об общественном устройстве. Однако забота об устойчивом развитии отдельной страны, компании или даже личного бюджета всегда проявляется и находит решение — возможно, не такое эффективное, как хотелось бы, зато, как правило, реально достижимое.

Конечно же, забота о минимальном влиянии выбросов на глобальные круговороты — это мощная объединительная идея для человечества. При этом очень важно, что сформировалась идея «зеленых» (к счастью, бескровных) революций в различных областях человеческой деятельности, дан старт новым технологиям. Однако нам надо понять и принять простую и обоснованную логику природы, которая в пределах своих собственных возможностей создает локальный климат. Такой климат нужен на территориях проживания человека — в его урбоэкосистемах, промзонах и даже небольших поселениях.

Вывод из наших рассуждений достаточно очевиден: имея возможность менять локальный климат, надо научиться делать это сознательно и направленно, т. е. создавать инженериию локального климата. Очень важно при этом научиться сознательно формировать климат промышленных зон или больших городов, где уже просто нельзя не

учитывать локальный парниковый эффект, создаваемый этими образованиями. Проектировщики говорят: вот «роза ветров», данная нам природой, что мы еще можем сделать? Оказывается, сделать можно многое. Например, в апрельском номере нашего журнала известный ученый и изобретатель Олег Фиговский написал о том, что для избавления столицы Австралии от перегрева ученые создали поверхность, покрытую наночастицами карбида кремния, которые позволяют снижать температуру поверхности, делая ее на 15 градусов ниже, чем температура окружающей среды. В этом изобретении ученые непосредственно использовали явление «радиационного пробоя», или окна прозрачности атмосферы, на длинах волн между 7,9 и 13 мкм. Излучение в этом диапазоне не перекрывается линиями поглощения парниковых газов, поэтому можно сбрасывать излишки тепла прямо в космос.

На основе этого изобретения можно создать регулятор локального «ледникового» эффекта и тем самым регулировать локальный климат зданий или города в целом (если предположить, что все тротуары покроют в перспективе наночастицами с заданными спектральными свойствами).

Очевидно, что можно предложить целый спектр решений и по управлению парниковым эффектом — за счет управления испарением воды, регулируя вертикальный градиент. Что касается управления осадками, то это уже делается, хотя порой весьма топорно и безоглядно.

К счастью, «память» погоды длится около двух недель, однако если систематически менять количество осадков, то локальный парниковый эффект может измениться, и тогда локальный климат станет другим!

Очевидно, что изучение вопросов локального регулирования климата, его инженерия должны идти по пути обучения у природы. Вполне реально ставить модельные эксперименты, проводить локальное моделирование. Инженерия климата, не ослабляя усилий в области глобальных моделей, должна научиться пониманию принципов регуляции теплообмена и регуляции живых экосистем, вписываться в эти процессы с учетом потребностей и задач человеческой деятельности. Тогда, возможно, и наступит время, когда человек окажется в состоянии отвечать за все, что происходит вокруг него, в том числе и в живой природе, — наступит эпоха глобальной ответственности человечества, о которой мечтал В.И. Вернадский.