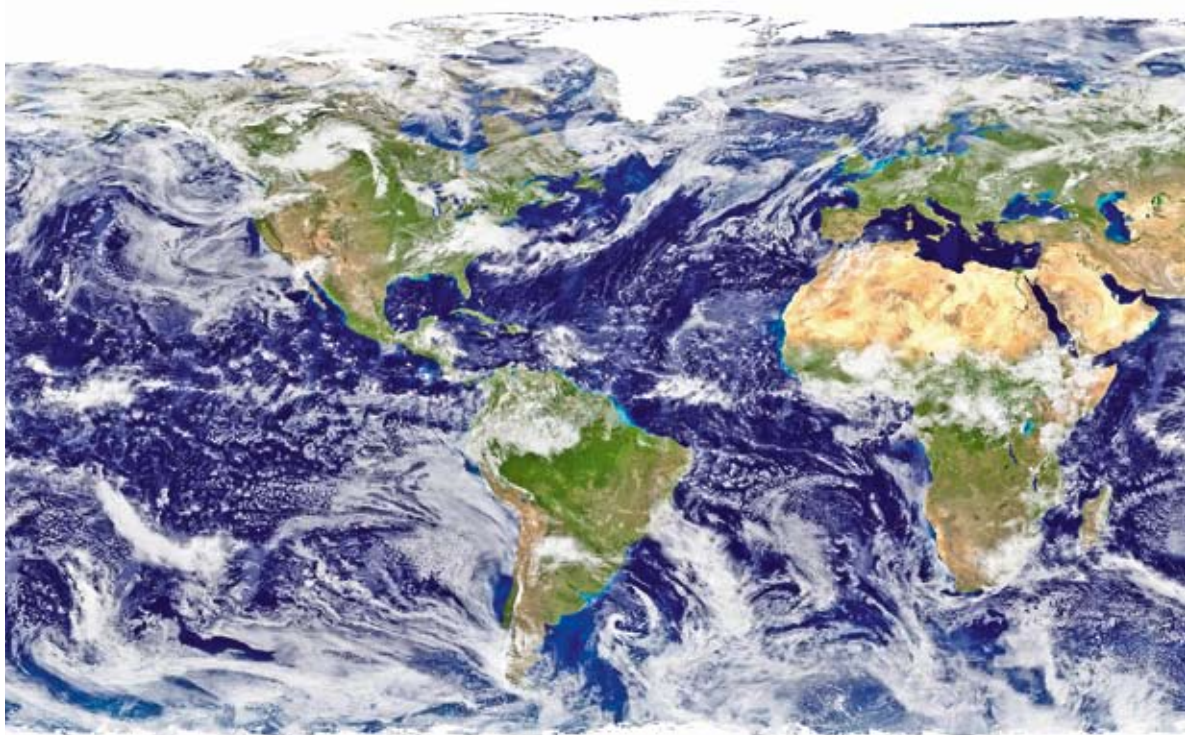




КЛИМАТ КАК ОТРАЖЕНИЕ ОБЛАКОВ

Кандидат физико-математических наук Александр ЧЕРНОКУЛЬСКИЙ,
Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН.

Что такое облака? Это взвешенные в атмосфере продукты конденсации водяного пара: капли воды и (или) кристаллы льда размером около 10—30 микрон. Практически все облака образуются в тропосфере (нижние 10—15 км атмосферы) и закрывают около двух третей нашей планеты. Несмотря на внушительные размеры и практически повсеместное распространение, они содержат не так уж много воды. Если сконденсировать всю воду, которая одновременно находится в облаках, и покрыть ею Землю, то получится слой в 0,1 мм — толщина человеческого волоса! Ирония в том, что от этого волоска во многом зависит климат нашей планеты.

Облака играют ключевую роль в радиационном режиме Земли. Причём их влияние определяется двумя разнонаправленными эффектами — альбедным и парниковым. Солнечный свет, попадая в облачную среду, испытывает многократное рассеяние, многие фотоны выходят из облака, по сути, в обратном направлении (именно поэтому облака кажутся

белыми). Таким образом, облака увеличивают альбедо Земли примерно в два раза — с 15% (такая доля энергии, поступающей от Солнца, отражалась бы в космос в отсутствие облаков) до 30% — и охлаждают планету. С другой стороны, они же её и утепляют: выступая как чёрное тело, облака поглощают собственное тепловое излучение Земли и переизлучают его в космос уже при более низкой температуре. В итоге часть тепла остаётся в климатической системе, работает парниковый эффект. Без облаков температура воздуха на Земле менялась бы гораздо сильнее от ночи ко дню и от зимы к лету — облака в чём-то схожи с бедуинской абой, которая днём помогает не перегреться, а ночью — не переохладиться.

А какой эффект преобладает? Это зависит от времени суток и сезона. Так, парниковый эффект доминирует ночью и зимой (в умеренных и полярных широтах), когда коротковолнового солнечного излучения либо нет совсем, либо мало. Днём и в летний сезон наблюдается обратная картина. Очень важны



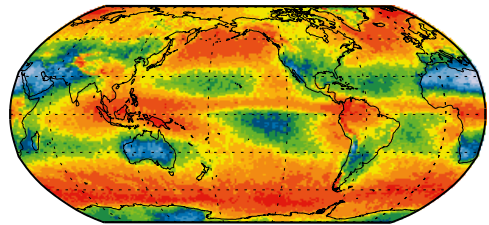
Иллюстрация: NASA Goddard Space Flight Center.

Композитный спутниковый снимок глобально-го поля облачности в атмосфере Земли.

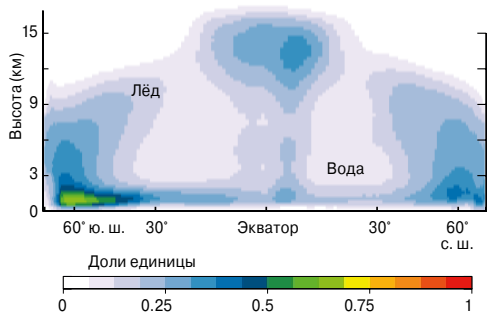
и свойства облаков. Например, чем выше у облаков водность и концентрация облачных капель, тем больше их альbedo. А чем выше верхняя граница облака, тем ниже температура этой границы, при которой происходит длинноволновое излучение в космос, и тем сильнее парниковый эффект. Характерно, что при оптической толщине облаков больше единицы их воздействие на длинноволновое излучение практически не увеличивается, а на коротковолновое — продолжает расти (рассеяние фотонов на коротких волнах в облаках многократное, а поглощение на длинных волнах происходит один раз). В результате «идеальные» охлаждающие облака — слоисто-кучевые и кучевые облака над тропическим океаном. Они находятся низко, и их температура не сильно отличается от температуры поверхности Земли, зато эти облака характеризует достаточно высокая оптическая толщина (около 10) и альbedo, которое гораздо выше, чем у тёмной водной поверхности под ними (50—60% вместо 10%). В качестве «идеальных» отепляющих выступают облака верхнего яруса — перистые и перисто-кучевые, которым свойственна низкая

Количество воды в облаках зависит от количества доступного водяного пара для конденсации (чем более влажный воздух, тем больше влаги он может сконденсировать), от количества ядер конденсации (аэрозолей), на которых и образуются облачные капли/кристаллы, от силы восходящего движения воздуха и других процессов. Основные характеристики облаков: среднегодовое количество (доля) облаков (а); среднегодовая повторяемость облаков на разных высотах, осреднённая по широте (б); среднегодовое содержание влаги в облаках, осреднённое по широте (в).

а СРЕДНЕГОДОВОЕ КОЛИЧЕСТВО ОБЛАКОВ
(в долях единицы)



б ПОВТОРЯЕМОСТЬ ОБЛАКОВ
(в долях единицы)



в ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ ОБЛАКОВ

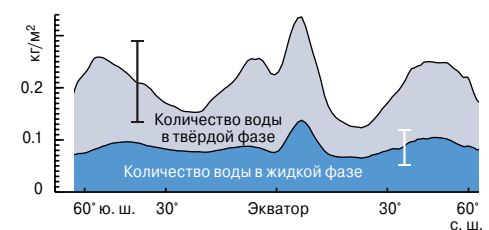


Рисунок адаптирован из статьи: Boucher et al., 2013: Clouds and Aerosols. In: WG1 AR5 IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Где	Глобальный среднегодовой облачно-радиационный эффект (разность радиационных потоков между обычными и безоблачными условиями), Вт/м ²		
	Коротковолновый	Длинноволновый	Суммарный
Верхняя граница атмосферы	-47	29	-18
Толща атмосферы	7	1	8
Поверхность Земли	-54	28	-26

Глобальный среднегодовой облачно-радиационный эффект, рассчитанный на основе спутниковых и наземных наблюдений, резко отличается для коротковолнового и длинноволнового излучения и зависит от высоты над поверхностью Земли. Источник: Wild et al., 2017, doi: 10.1063/1.4975552.

температура на верхней границе (-30—50°C) и невысокие значения оптической толщины (около единицы или чуть ниже).

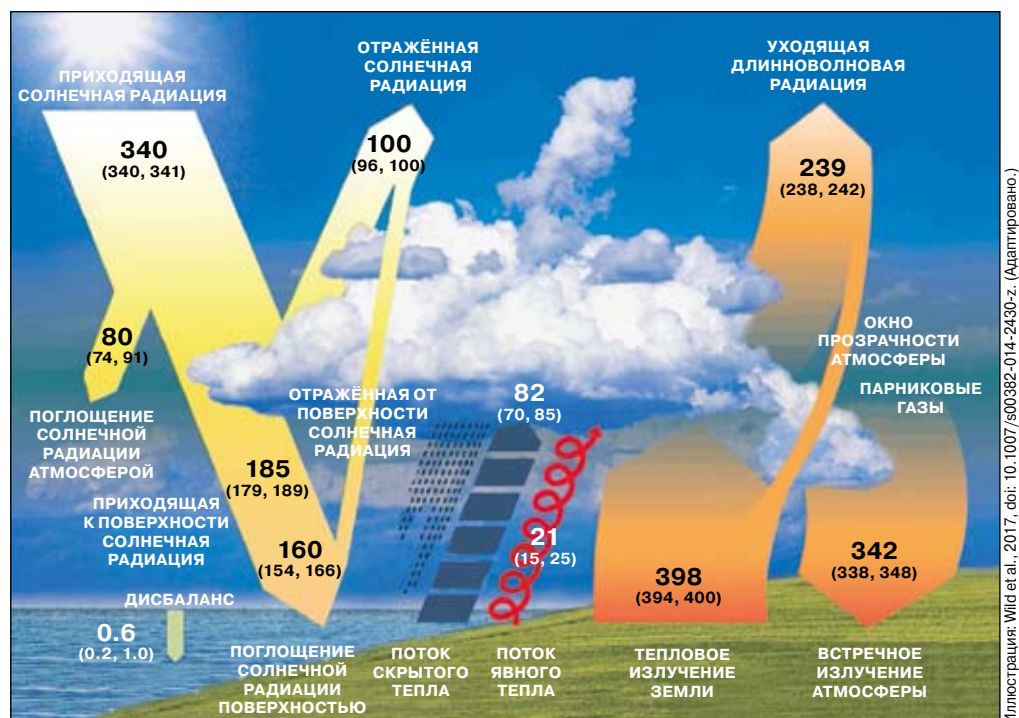
Итак, действие облаков на температуру зависит от многих факторов. Но всё же, какой из них преобладает в масштабах планеты? Для ответа на этот вопрос удобно посмотреть на

величину облачно-радиационного эффекта. Рассчитывается она как разность между радиационными потоками в коротковолновой и длинноволновой частях спектра при обычном (с реальным количеством облаков) и ясном небе, как если бы облаков не было. По самым точным на сегодняшний день оценкам (сделанным на основе спутниковых и наземных наблюдений), коротковолновый эффект преобладает, и облака в целом охлаждаают планету.

Но почему они считаются «головной болью» климатологов? Дело в том, что с облаками связаны наибольшие неопределённости в оценках будущих изменений климата. В пятом оценочном докладе Международной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) отмечается: «Существует весьма высокая степень достоверности того, что первичным фактором, вносящим вклад в разброс значений равновесной чувствительности климата, остаётся обратная связь облаков». Здесь надо разъяснить два очень важных в климатологии термина: равновесная чувствительность климата и обратная связь.

Под равновесной чувствительностью климата договорились понимать изменение равно-

Глобальные среднегодовые радиационные и тепловые потоки в атмосфере по данным наблюдений (в Вт/м², в скобках показан диапазон неопределённости оценок).





весного (то есть стабильного, вышедшего на некое равновесие) состояния среднегодовой глобальной приземной температуры воздуха в ответ на удвоение концентрации углекислого газа в атмосфере. То есть это та прибавка к глобальной температуре воздуха, которая возникнет после удвоения CO_2 в атмосфере по сравнению с его доиндустриальным значением 280 частей на миллион. Кстати, сейчас концентрация CO_2 уже выросла до 405 частей на миллион. Поскольку геофизики не могут поставить реальные эксперименты с глобальным

Кучево-дождевое облако с наковальней перистых облаков.

климатом, подобные оценки чувствительности получены на основе ограниченных данных наблюдений и палеоданных, а также численных экспериментов с использованием современных математических моделей земной системы, которые включают в себя описание процессов, происходящих во всех оболочках Земли, участвующих в формировании климата. И эти оценки по разным моделям



Изменения свойств облаков, связанные с усилением парникового эффекта. Красным шрифтом показаны процессы, надёжно определённые в исследованиях и обладающие значимой положительной обратной связью. Серым шрифтом показаны либо процессы с незначимой обратной связью, либо процессы, в оценках изменений которых на данный момент нет научного консенсуса. Рисунок адаптирован из статьи: Boucher et al., 2013: Clouds and Aerosols. In: WG1 AR5 IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

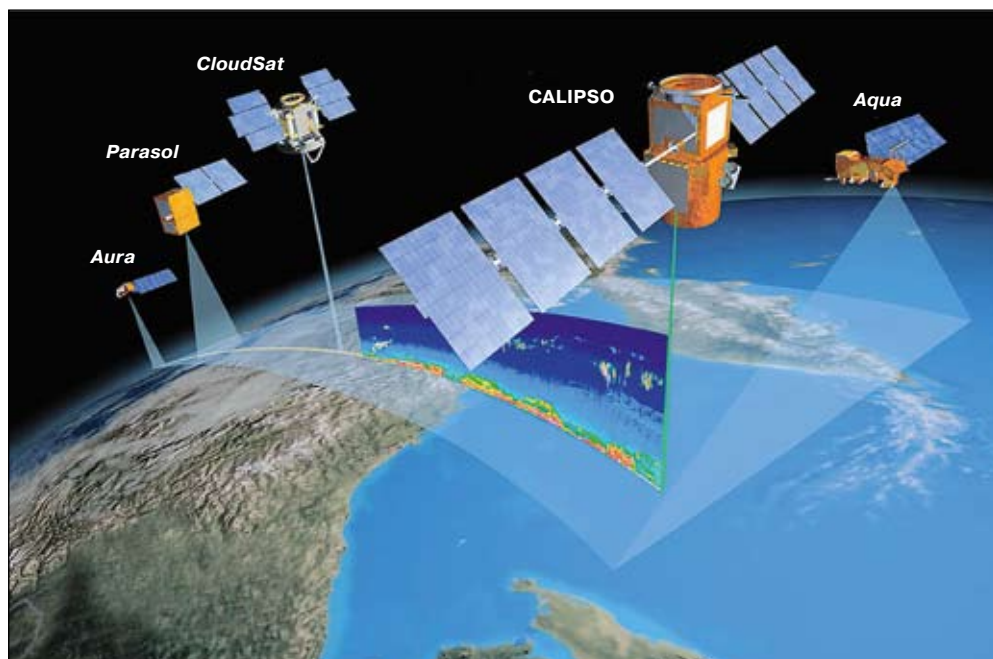


Иллюстрация: NASA Langley Research Center.

Пример различных спутниковых наблюдений за облаками: пассивные наблюдения на разных длинах волн (спектрорадиометр MODIS на спутнике Aqua) и с разной поляризацией (поляриметр POLDER на спутнике PARASOL) позволяют получить пространственное распределение облаков; активные радарные (облачный радар CPR на спутнике CloudSat) и лидарные (лидар CALIOP на спутнике CALIPSO) наблюдения дают возможность получить информацию о вертикальном строении облаков. Объединение спутников в одну систему даёт трёхмерную картину (в данном случае — система A-Train, спутники находятся на одной солнечно-синхронной орбите, пролетают с разницей в несколько десятков секунд).

(а их насчитывается около 30 в мире) имеют разброс от 2,1°C до 4,7°C. Разные модели, в зависимости от своей чувствительности, показывают и разную концентрацию CO₂ в атмосфере, необходимую для преодоления порога потепления в 2°C (который был определён как критический в Парижском соглашении по климату 2015 года), — от 470 до 660 частей на миллион. Разброс внушительный! Причина такого разброса кроется в облаках, а точнее, в том, как в моделях описаны обратные связи, обусловленные облаками.

Под термином «обратная связь» понимают отклик системы на какое-либо внешнее воздействие. Климатологи обычно рассматривают антропогенные выбросы парниковых газов (и соответствующее усиление парникового эффекта) как внешнее воздействие и оценивают ответные реакции различных составляющих климата на это усиление. Эти реакции могут в свою очередь вести к ещё большему потеплению (так называемые положительные обратные связи) или, напротив, действовать в обратную сторону (отрицательные обратные

связи). В земной климатической системе таких связей десятки, если не сотни, они работают на разных временных масштабах (от часов до столетий), задействуют разные элементы системы, обладают разным количественным и пространственным эффектом (некоторые связи важны, некоторые почти незаметны). Пример положительной обратной связи: рост температуры ведёт к сокращению снежного и ледового покрова, который обладает большим альбедо, чем поверхность под ним, в результате в космос отражается меньше коротковолнового излучения, тепло задерживается в климатической системе, что ведёт к дополнительному росту температуры. Пример отрицательной обратной связи: в соответствии с законом Генри, чем больше CO₂ в атмосфере, тем активнее он поглощается океаном.

Облака участвуют в большом числе обратных связей. Глобальные изменения климата могут влиять как на макрофизические характеристики облаков (их количество, высоту), так и на микрофизические (размер и количество

облачных капель, фазовое состояние). Эти изменения в свою очередь могут увеличить или уменьшить рост глобальной температуры. Например, радиационное воздействие удвоения CO_2 составляет 3,7—3,8 Вт/м², что почти на порядок меньше, чем облачно-радиационный эффект. Изменение этого эффекта на 10—15% могло бы полностью скомпенсировать влияние парниковых газов! Да вот только происходит всё наоборот: пока большинство найденных и изученных облачных обратных связей положительно.

С чем это связано?

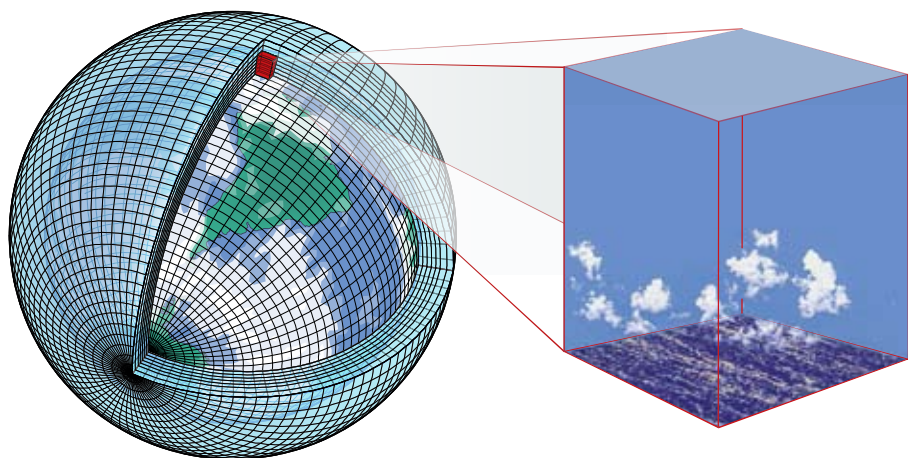
Во-первых, из-за парникового эффекта происходит сдвиг к полюсам траекторий движения циклонов, что приводит к росту площади малооблачной субтропической воздушной массы (а значит, к поверхности поступает больше солнечного света) и смещению облачных полей, связанных с циклонами, в регионы, где энергии от Солнца приходит меньше (а значит, и отражаться её облаками будет меньше). Во-вторых, в связи с разогревом тропосферы в тропических областях увеличивается высота облаков верхнего яруса, при этом их температура практически не меняется (так называемый эффект неизменной температуры наковальни). В результате всё сильнее становится парниковый эффект: растёт разница температуры между всё более тёплой поверхностью Земли и неизменно холодными перистыми облаками. В-третьих, общий рост влагосодержания атмосферы (чем теплее воздух, тем больше влаги он содержит) приводит к изменению свойств слоисто-кучевых облаков над океаном субтропических широт в обоих полушариях. При этом преобладают

эффекты, обуславливающие сокращение и утоньшение облаков нижнего яруса, что вызывает уменьшение их охлаждающего эффекта. Ещё одна положительная обратная связь наблюдается в Арктике: здесь сокращение льда ведёт к росту площади открытой водной поверхности (источнику влаги и аэрозолей) и, как следствие, к росту облачности, которая в Арктике обладает сильным тепляющим эффектом.

Основная отрицательная обратная связь — изменение фазового состояния воды в облаках: в более тёплом климате всё больше воды в облаке находится в жидком виде, это приводит к увеличению оптической толщины и росту альбедо облаков. Также возможны отрицательные обратные связи, обусловленные взаимодействием облаков и аэрозолей или процессами самоорганизации конвекции в тропиках. Например, есть работы, показывающие возможный рост концентрации морских аэрозолей из-за усиления ветрового волнения в умеренных широтах в связи с изменениями климата. Эти аэрозоли, частицы которых выступают в качестве ядер конденсации, будут увеличивать протяжённость и продолжительность жизни облаков. А рост температуры в тропиках может вести к усилению процессов самоорганизации конвекции (мощные конвективные облака будут развиваться в определённых узких кластерах), что способно вызывать сокращение верхней облачности

Схема ячеек глобальной климатической модели (слева) и пример результата расчёта облаков в одной ячейке с помощью вихреразрешающей модели с горизонтальным разрешением 5 м.

Иллюстрация: Schneider et al., 2017. doi:10.1038/nclimate3190.



Активное дистанционное зондирование — изучение объекта (без непосредственного контакта с ним) с помощью излучения сигнала в направлении объекта и последующего измерения обратного сигнала (отражённого или рассеянного). Со спутников, например, облака изучают с помощью радаров (излучают радиоволны обычно на частоте 94 ГГц) или лидаров (излучают световой луч обычно на длине около 530 нм).

Альbedo — величина, характеризующая отражательную способность объекта. Чаще всего выражается в виде отношения (в процентах) интенсивности отражённой радиации к интенсивности падающей радиации. Например, альbedo

25% обозначает, что объект отражает обратно четверть приходящей радиации.

Длинноволновая радиация — в физике атмосферы обычно обозначает электромагнитное излучение, испускаемое земной поверхностью и атмосферой в интервале длин волн от 4 до 120 мкм (максимум энергии находится на длинах волны около 11 мкм). Иногда его называют инфракрасным или тепловым излучением.

Коротковолновая радиация — обычно обозначает прямую и рассеянную солнечную радиацию в интервале длин волн от 0,17 до 4 мкм (максимум энергии находится на длинах волны около 0,5 мкм), то есть включает в себя области

ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного излучения.

Оптическая толщина — величина, характеризующая ослабление излучения в среде (атмосфере, облаке, аэрозольном слое) за счёт поглощения и рассеяния. Определяется как натуральный логарифм отношения интенсивности падающего излучения к интенсивности излучения, прошедшего через среду. Например, оптическая толщина равна 2 в том случае, когда сигнал ослабляется средой в e^2 раз. Для облаков варьируется от долей единицы (для полупрозрачных перистых облаков) до сотен (для мощных кучево-дождевых облаков).

и уменьшение её парникового эффекта (это явление ещё называют «эффект зрачка»).

Некоторые из перечисленных связей видны по наблюдениям. Например, спутники «видят» смещение траекторий циклонов, рост верхней границы облаков, рост доли облаков в жидкой фазе. Но некоторые связи заметить и вычлениить довольно сложно. Более того, число глобальных наблюдений за облаками пока ещё недостаточно и не даёт ответа на вопрос о величине обратной связи облаков (под такой величиной климатологи обычно понимают чувствительность облачно-радиационного воздействия к изменению приземной температуры воздуха). Поэтому основные оценки этой величины получены на основе расчётов с численными моделями климата. Согласно тому же Пятому отчёту МГЭИК, результирующая обратная связь, обусловленная облаками, по разным моделям оценивается от $-0,2$ до $+2,0$ Вт/м² К. Вот, собственно, и источник разброса в чувствительности моделей к удвоению CO₂. Он связан с тем, что в разных моделях облака по-разному реагируют на рост температуры — либо его усиливают, либо уменьшают. Почему же это происходит?

Проблема адекватного описания облачных процессов в моделях связана с различием в масштабе этих процессов и разрешении моделей. Характерные размеры одного облака могут составлять сотни метров, турбулентные потоки, определяющие эволюцию облака, — десятки метров, а образование облачных капель и кристаллов вообще происходит на микронном уровне, в то время как разрешение современных моделей составляет около 50—100 км по горизонтали и около 100—200 м (для нижних слоёв атмосферы) по вертикали. Этого явно недостаточно для того, чтобы рассчитать эволюцию каждого облака. Поэтому облачные процессы в моделях параметризованы: используются найденные на основе наблюдений эмпирические зависимости. В итоге обратные связи облаков, обусловленные крупномасштабной динамикой (сдвиг траекторий циклонов, рост высоты верхней границы облаков), модели описывают достаточно хорошо и не сильно различаются в количественной оценке этих связей. Более тонкие же моменты (такие, как изменение свойств нижней облачности над субтропическими океанами или самоорганизация конвекции) модели описывают

Пассивное дистанционное зондирование — дистанционное зондирование объекта, при котором сенсоры регистрируют собственное излучение объекта либо отражённый им солнечный свет. Чаще всего такое зондирование ведётся на нескольких длинах волн, иногда — с учётом поляризации.

Планетарный пограничный слой — нижний слой атмосферы, начинающийся от земной поверхности, свойства которого в существенной мере определяются взаимодействием с этой поверхностью. Его толщина варьирует от первых сотен метров до 1—2 км.

Устойчивость атмосферы — способность атмосферы к поддержанию (и усилению

или затуханию) вертикальных возмущений воздуха в зависимости от вертикального распределения температуры и влажности. Чем теплее и влажнее воздух, тем он легче, в связи с этим чем больше вертикальный температурный градиент (чем быстрее температура падает с высотой), тем меньше устойчивость атмосферы, и наоборот.

Циклон — атмосферное возмущение с пониженным давлением воздуха (минимальное давление в центре циклона) и циркуляцией воздуха вокруг центра против часовой стрелки в Северном полушарии и по часовой в Южном. Выделяется несколько типов циклонов: внетропические (их размер — первые тысячи километров, такие

циклоны термически неоднородны: есть тёплый и холодный секторы циклона, разделяющие их атмосферные фронты), тропические (размер — сотни километров, воздушная масса однородна по температуре, такие циклоны отличают большие градиенты давления и большие скорости ветра), полярные мезоциклоны (схожи с тропическими, но меньше по размеру, формируются в полярных районах).

Эль-Ниньо — значительное колебание температуры поверхности Тихого океана в приэкваториальной части с периодом 3—8 лет. Выделяют тёплую фазу (собственно Эль-Ниньо), когда отмечается рост температуры воды, и холодную фазу (так называемая Ла-Нинья).

недостаточно адекватно и демонстрируют сильные различия.

Впрочем, и системы наблюдения за облаками далеки от совершенства. Даже в определении общего количества облаков по разным спутниковым данным есть существенный разброс.

Одна из важнейших задач современной климатологии — верно определить и смоделировать все облачные процессы. Прогресс идёт с двух сторон: появляются всё более совершенные системы наблюдений, включая пассивное поляризационное и многоспектральное, а также активное радио- и лидарное зондирование облаков, позволяющее получать информацию о трёхмерной структуре разных характеристик облаков, и растёт разрешение моделей. Правда, этот рост упирается в компьютерные мощности. Чтобы численно воспроизвести турбулентные потоки в облаке, необходимо уменьшить ячейку модели до 10 м. Исследования показывают, что достаточная мощность суперкомпьютеров (которая удваивается примерно каждые 14—15 месяцев) для запуска таких моделей появится только в 2060-х годах.

Выход предлагается искать в совместном использовании глобальных климатических моделей и так называемых вихреразрешающих моделей, которые могут явно описывать турбулентные потоки. Например, в отдельных ячейках глобальной модели могут быть запущены подобные вихреразрешающие модели, и на основе сравнения с данными наблюдений о трёхмерной структуре облаков уже созданы так называемые суперпараметризации облачных процессов. Эти суперпараметризации (то есть, по сути, практически совершенные параметризации) можно будет затем распространить на другие ячейки глобальной модели, в том числе на основе методов машинного обучения. Именно это одно из направлений, в которых сейчас развивается современная климатология. И возможно, что уже в ближайшем будущем учёные смогут сузить разброс оценок чувствительности климата к удвоению CO_2 . Ведь именно на этом разбросе и спекулируют далёкие от климатической науки политики, специалисты и общественные деятели, которые говорят о несовершенстве моделей, ничтожном вкладе человека, а то и вовсе об отсутствии глобального изменения климата.