Роль радиационного фактора в формировании климата Земли

С.М. Семенов

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН
Институт географии РАН

Опыт некоторых последних докладов на нашем семинаре показал, что, начиная тематическую серию, лучше предварить ее вводным докладом, где в простой форме представлялись бы основные понятия, процессы и проблемы. Поскольку мы вскоре предполагаем послушать доклады о моделировании прохождения излучения через атмосферу Земли, в частности, о процессах рассеяния и поглощения излучения, сегодня я сделаю введение в эти вопросы. В докладе будут четыре части (см. слайд 2):
- Что такое климат и какие процессы формируют климат Земли;
- Потоки лучистой энергии в системе «атмосфера + земная поверхность»;
- Парниковый эффект;
- Антропогенное усиление парникового эффекта - радиационная составляющая глобального потепления.

Что же такое климат? Все привыкли к этому термину, но лучше всё-таки повторить (см. слайд 3):

<u>Климат</u> – это средняя погода за продолжительное время, за 1, 2, 3 десятилетия.

Если мы говорим о гидрометеорологической обстановке первой недели июля этого года, это **погода** первой недели июля этого года, а если мы говорим о средней температуре первой недели июля лет за двадцать, то это будет **климат** первой недели июля.

Т. е. климат - это погода без привязки ко времени, средняя характеристика. Но не только. Бывают ещё отклонения от средней характеристики - ведь первая неделя июля бывает более холодная или менее холодная по сравнению с климатическим средним (климатической нормой). И вот то, насколько температура уклоняется от среднего климатического значения, этот разброс тоже является характеристикой климата. Т. е. климат - не только среднее значение, но и распределение отклонений от среднего значения.

Пример: если мы рассматриваем два последовательных тридцатилетия, то они могут отличаться не только средними, но и разбросом (дисперсией). В частном случае средние могут остаться те же, а разброс увеличится или уменьшится, и это тоже будет изменением климата.

Как возникают эти средние значения? Как возникают колебания вокруг среднего? Это всё формирует «климатическая машина» Земли, климатическая система. Она состоит из атмосферы, гидросферы, биосферы (это живая

часть), педосферы (почвогрунты). Между ними есть обмен веществом и энергией. Причем, если по веществу Земля практически замкнута, то по энергии – нет. Внешний источник энергии – Солнце, как известно. От Солнца мы получаем лучистую энергию, которая потом перераспределяется между частями этой климатической машины. Энергия превращается из первичной формы – лучистой энергии солнечного потока - в энергию других видов, и в конечном счете - в тепло. Обратно в космос энергия уходит в виде инфракрасного излучения.

Мои коллеги Г. В. Груза и Э. Я. Ранькова так определили в своё время климат – см. слайд 4 (есть много определений климата, но это такое человеческое определение).

Если есть два отрезка времени, то мы можем обсуждать: похожи ли климаты этих двух отрезков времени или не похожи. Но для двух разных частей пространства обсуждать этот вопрос довольно сложно, потому что они, скорее всего, не похожи, если уж только они не лежат в совсем одинаковых условиях по широте. То есть климат, говоря математически, есть некоторая вектор-функция, аргументами которой служат точка трехмерного пространства и момент времени, а значениями – вектор, компонентами которого являются заданные гидрометеорологические величины, которые изучаются.

Ну, определение определением, а как исследуют климат? Его исследуют (см. слайд 5) с помощью разложения этой вектор-функции на две составляющие - медленную и быструю. Что такое медленная и быстрая обычно решает исследователь, так как универсального определения нет. Медленная часть считается изменением климата, а быстрая – изменчивостью. Последняя описывается обычно статистической моделью.

Приведу два примера. Это (см. слайд 6) ход среднегодовой температуры на станции Санкт-Петербурга за довольно большой период времени – с 1850 года. Вот эта прямая линия – это изменение климата, медленное изменение величины. А эти прыжки вокруг неё – это случайная изменчивость. Эта линейная функция - медленная составляющая, а «прыжки» - быстрая составляющая, которая описывается обычно статистической моделью. Другое дело – причины, отчего происходят изменение климата и отчего возникает этот «шум». Это уже вопросы атрибуции и анализа. По эмпирике этого понять нельзя. Здесь мы можем только видеть медленную и быструю составляющие изменения.

Ещё один пример (см. слайд 7). Спасибо Эсфири Яковлевне Раньковой за эту картинку, которую она мне прислала. Это - глобальная среднегодовая температура. Сверху также проведена линия, которая обусловлена возрастанием концентрации CO_2. Она получена путем регрессии температуры на концентрацию углекислого газа. Потом эту линию взяли и вычли из хода температуры. Получилась средняя картинка. Как видно, среди составляющих хода глобальной температуры есть не только упомянутые выше короткопериодные прыжки, но и ещё какая-то волнообразная линия. Она также соответствует медленным изменениям климата. Длина цикла – примерно 60 лет. Это тоже изменение климата. Эта составляющая обусловлена, скорее всего,

астрономическими причинами, но это пока не известно. Так или иначе, Георгий Вадимович Груза и Эсфирь Яковлевна Ранькова выделили эти колебания. Анализ причин этих колебаний – другая задача. Другой науки. Математической астрономии, если угодно. Когда и эту линию вычли, остались только вот такие прыжки – см. нижнюю панель слайда 7. Спрашивается: какова причина этой короткопериодной изменчивости? Попытка объяснить это одиннадцатилетним циклом солнечной активности ни к чему не привела. Из зала вряд ли видно: здесь, на нижней панели, имеются колебания с ничтожной амплитудой. Это наилучшее приближение линейной функцией от чисел Вольфа. Видно, что числа Вольфа здесь ничего не объясняют. Короткопериодные колебания обусловлены другими причинами. Какими другими причинами? Может быть это – внутренние, собственные колебания климатической системы, возникающие вследствие существенно различных характерных времен процессов, протекающих в ее компонентах. Причина этих колебаний пока не ясна.

Итак, в результате работы климатической системы образуется климат Земли. В его образовании доминирующую роль играет Солнце. На слайде 8 (картинка – из работы Тренберта с соавторами 2009 г.) изображен глобальный бюджет энергии на Земле. От Солнца, «сверху», к верхней границе атмосферы приходит 341 Вт/м^2 <u>в среднем по земной поверхности</u>. Часть сразу отражается от облаков и атмосферы и уходит обратно в космос, часть поглощается (небольшая, примерно 25%). Часть проходит дальше, достигает земной поверхности, частично ею отражается (около 12.5%), остальное поглощается.

Заметим, что практически все излучение, приходящее от Солнца, имеет длину волны < 3 мкм. В процессе рассеяние света длина волны не меняется.

От земной поверхности вверх уходят потоки энергии разной природы - радиационный и нерадиационный (см. слайд 8). Нерадиационный сравнительно невелик. Вот термики – теплые пузыри воздуха, которые поднимаются вверх. На них любят подниматься планеристы. А вот это – скрытое тепло. Когда у земной поверхности испаряется вода, тепло поглощается, а когда поднявшийся наверх водяной пар при более низких температурах конденсируется, то тепло выделяется. Вот этот насос перекачивает тепло с земной поверхности наверх.

Но все же большая часть тепла уходит от земной поверхности наверх в виде излучения, в виде потока инфракрасного излучения (в основном, с длиной волны > 3 мкм). В отличие от излучения, приходящего от Солнца, излучение Земли очень сильно поглощается атмосферой. Лишь некоторая малая часть ушедшего от земной поверхности инфракрасного излучения (40 Вт/м^2) беспрепятственно уходит прямо сразу в космос. Остальное поглощается атмосферой, потом частично направляется обратно к земной поверхности, а частично – в космос.

Заметим, что климатическая система Земли находится практически в состоянии равновесия по энергии: сколько солнечной энергии поглощается

атмосферой и земной поверхностью, столько же уходит в космос в виде инфракрасного излучения.

Есть, правда, еще один поток энергии – геотермальный: тепло, идущее прямо из глубин Земли. Он есть, но очень маленький. Если от Солнца приходит 341 Вт/м^2, то геотермальный поток – 0.06 Вт/м^2. Эти величины абсолютно не сравнимы. Солнце является доминирующим источником энергии на Земле.

Поговорим немного о двух потоках нерадиационной природы. Евгений Михайлович Володин на предыдущих заседаниях нашего семинара говорил о них, о технологии их моделирования, и я совсем кратко и в простых терминах об этом еще раз скажу (см. слайд 9).

Представим себе некий шаровидный пузырь воздуха в какой-то точке атмосферы. Поднимем его наверх, быстро. Давление, естественно, при этом упадет. Если все происходит действительно быстро, и теплообменом через границу пузыря можно пренебречь, то процесс – адиабатический, без приобретения и потерь тепла внутренностью пузыря. В таком случае температура внутри пузыря будет связана с давлением степенной зависимостью $T \sim p^{(k-1)/k}$, где $k > 1$. Если реальный вертикальный профиль температуры круче этого степенного, адиабатического, то поднятый нами пузырь будет теплее окружающего воздуха и, тем самым, будет иметь объем больший, чем его «собратья» той же массы на той же высоте. Значит его плотность меньше, чем у окружающего воздуха, и архимедова сила будет поднимать его еще выше. Заметим, что если бы мы вместо подъема опустили бы этот пузырь, то он продолжил бы «тонуть». Так развивается вертикальное перемешивание при сверхадиабатическом градиенте температуры. При этом происходит нетто-перенос тепла вверх.

Все сказанное относилось к сухому воздуху. Если же в нем присутствует водяной пар, то при поднятии этого пузыря там может происходить конденсация, а при конденсации будет выделяться тепло. Это будет дополнительно «подогревать» этот пузырь с воздухом, и он будет ещё живей подниматься наверх.

Конечно, есть и горизонтальный нерадиационный перенос энергии путем адвекции – переноса с воздушными массами. Океанические течения и вертикальные токи в океане осуществляют перенос и распределение тепла в океане.

В атмосфере Земли есть два мощных радиационных механизма переноса энергии: это рассеяние и излучение/поглощение. О них мы сейчас поговорим.

Прежде всего, что такое излучение. Мы привыкли к тому, что в бытовом смысле излучение – луч, луч света, видимый свет. Мы рисуем себе некую картину, как свет распространяется линейно в определённом направлении и т. д. На самом деле, свет – электромагнитная волна. Такая волна – совместное изменение в пространстве и во времени напряженности электрического $\boldsymbol{E}$ и магнитного $\boldsymbol{H}$ полей, которое предписывается уравнением Максвелла (см. слайд 10). Есть плоская волна, вот такая вот (см. слайд 11). Она

распространяется в направлении z. Вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости, перпендикулярной этому направлению. Компоненты вектора электрического поля меняются с какими-то амплитудами E_1 и E_2 по закону косинуса. Только косинусы по времени сдвинуты один относительно другого. Из этих уравнений следует, что точка (E_x, E_y) находится на эллипсе. Если с течением времени эллипс не меняется, то это называется «полностью поляризованный свет». От источника – от Солнца - идёт смесь всего. Солнечный свет не поляризован. А взаимодействуя с каким-нибудь веществом, с газом, например, он иногда частично поляризуется.

Итого, плоская волна – это такое простое периодическое изменение напряженности поля в пространстве. В направлении распространения это некий косинус по координате z, а если стоять в одной точке – это тоже косинус, но по времени (см. слайд 12). Естественно, у этих двух процессов изменения – в пространстве и во времени - есть свои периоды. Отношение периода по пространству к периоду по времени – это скорость распространения волны. В вакууме скорость распространения одинакова для излучения всех длин волн. Это – скорость света (см. слайд 13). Заметим, что частота является более универсальной характеристикой монохроматического излучения, чем длина волны. При переходе из одной среды в другую длина волны меняется (из-за изменения скорости распространения), а частота – нет.

На этой картинке (см. слайд 13) для примера нарисованы длины волн и диапазон частот для видимого света. Чтобы вы себе просто представляли эти величины. Например, для голубого цвета это 600 ТГц = $600 \cdot 10^{12}$ Гц, а то, что у нас в электрической розетке – всего 50 Гц.

Излучение Солнца взаимодействует с веществом, в частности с атмосферным воздухом. В результате наблюдается явление, которое называется «рассеяние». Для монохроматической составляющей это явление заключается в следующем (см. слайд 14): некоторая часть параллельного пучка взаимодействует с частицей и возбуждает в ней электромагнитные колебания, в результате чего она, частица, начинает распространять излучение в разные стороны. При этом параллельный пучок частично преобразуется в тот, что распространяется в разных направлениях, на той же частоте без потери общей мощности излучения. В смешанном, немонохроматическом потоке рассеяние происходит покомпонентно.

Рассеянный поток излучения распространяется в разных направлениях, вообще говоря, неодинаково, а в разных пропорциях. Это называется «индикатриса рассеяния». Присутствующая здесь Элеонора Александровна Чаянова много и успешно занималась индикатрисами рассеяния и продолжает заниматься этим до сих пор.

Свойство рассеиваться ухудшается с увеличением длины волны; хорошо рассеивается коротковолновое излучение и хуже - длинноволновое. Синий свет лучше рассеивается, чем красный. Способность к рассеянию у излучения падает пропорционально четвёртой степени длины волны. То есть совершенно стремительно падает.

Напомню об отражении. Это то, что мы привыкли видеть на картинке глобального бюджета энергии в климатической системе Земли: приходящий поток энергии частично отражается атмосферой обратно в космос. Отражение – это рассеяние назад.

Вот немного более подробная картинка (см. слайд 15). Рассмотрим некоторый объем, в котором есть частицы радиуса r (будем так называть эти образования; на самом деле, что такое частица есть большой вопрос). Вот, слева, набегающий параллельный поток монохроматического излучения с определённой длиной волны λ. Частицы считаются круглыми, сферическими. Есть характерное расстояние между ними d. Излучение (какая-то часть потока) взаимодействует с этими частицами, после чего рассеивается - распространяется в определённых пропорциях <u>в разных направлениях</u>. В классическом случае рассеяние происходит без потерь энергии – мощность потока рассеянного излучения в точности такая же, как мощность той части набегающего потока, которая вступила во взаимодействие с частицами.

Ну, если частицы в рассматриваемом объеме расположены не очень густо, т. е. типично находятся довольно далеко друг от друга ($d >> r$), то общий эффект рассеяния будет суммой эффектов рассеяния на каждой из частиц.

Для случая, когда размер частицы r существенно меньше длины волны λ (см. слайд 16) эффект рассеяния количественно описал в 1899 г. английский ученый Джон Стрэтт, лорд Рэйли (в русскоязычной литературе укоренилось «Рэлей»), см. слайд 17. Вот его формула (см. слайд 18) для потока рассеянного излучения, для распределения по углу рассеяния θ.

Можно видеть, в частности, что

- число частиц в рассматриваемом объеме N входит линейно, мы об этом уже говорили выше;

- свойство рассеяния уменьшается с ростом длины волны пропорционально ее четвертой степени; именно <u>поэтому безоблачное небо (при незапыленной атмосфере) имеет голубой цвет</u> – этот поток рассеивается гораздо сильнее, чем для бОльших длин волн, а ведь мы видим в рассеянном свете;

- рассеянный поток обратно пропорционален квадрату расстояния до наблюдателя;

- хотя рассеяние происходит на «сферических» частицах, рассеяние не «сферическое» (см. слайд 19); угол рассеяния θ входит в формулу в виде множителя $(1 + \cos^2\theta)$; т.е., например, рассеяние в направлении набегающего потока вдвое сильнее, чем в перпендикулярном направлении!

Однако то, на чём рассеяние происходит,- не обязательно «малые» сферические частицы. Это может быть аэрозоль самых разнообразных форм, совсем не обязательно сферической, это могут быть капли воды, облаков, туманов. Это могут быть вообще флуктуации плотности. В заданном маленьком объеме количество молекул по случайным, статистическим причинам может оказаться то больше, то меньше среднего. Вот это тоже те частицы, так сказать, на которых может происходить рассеяние.

Когда линейный размер частиц сравним с длиной волны или больше, там наука другая, законы Рэлея не приложимы. Были такие два человека Гу-

став Ми и Август Ляв. Почему «Love» читается «Ляв», я не знаю, но, тем не менее, в литературе российской он так пишется. Они создали теорию рассеяния в этом более сложном случае, когда размер частиц сравним или превосходит длину волны. В этом случае ярко выраженной зависимости эффекта рассеяния от длины волны нет. Рассмотрим более крупные частицы: например, капли тумана, капли в облаках. Они имеют размер больше, чем длина волны составляющих видимого излучения, солнечного света. Размер капель в облаках 5 мкм, в тумане – 1 мкм. Получается так, что как набегал на них солнечный, белый свет, и после рассеяния он остался практически белым. Туман для нас белый, облака белые, только они бывают немного темноватые, но это всё равно «тёмный белый цвет». Я думаю, что больше о рассеянии я говорить не буду, потому что после меня Дмитрий Арсеньевич Северов о теории Ми расскажет отдельно - здесь есть прямой выход на то, чем занимаются в этом Институте. Юрий Антониевич Израэль этим занимался: он исследовал возможности применения искусственно вносимых в стратосферу аэрозолей как «микрозеркал», которые дополнительно отражают солнечное излучение в космос и, тем самым, способствуют охлаждению приповерхностного слоя, противодействуя современному парниковому глобальному потеплению. Там, судя по размерам аэрозолей, как раз и нужна теория Ми, а не классическая теория Рэлея.

Давайте теперь поговорим о поглощении/излучении электромагнитных волн. Любые тела излучают. Мы, когда говорим о солнечном свете, имеем в виду видимое излучение. На Солнце огромная температура (примерно 6000 К) и то, что излучает фотосфера Солнца, в основном лежит в видимом диапазоне. Однако излучают любые тела, в том числе более холодные. И Земля излучает, хотя температура земной поверхности совсем не та. Это лишь около 288 К, 15ºС. Мы не видим этого излучения. Соответствующие длины волн, его составляющих, в основном, больше 3 мкм. Это – инфракрасное излучение (а еще правее ещё более длинноволновое излучение находится). Но, тем не менее, хотя мы это излучение не видим, это не мешает телам обмениваться энергией с помощью излучения в этих диапазонах. Всё, что есть в этой комнате, излучает и поглощает электромагнитное излучение.

Сколько же излучает тело, нагретое до заданной температуры (см. слайд 21)? Какова мощность потока электромагнитного излучения и как он распределяется по длинам волн? На эту тему есть два закона (см. слайд 22).

Первый – это закон Стефана-Больцмана: с единицы площади поверхности тела при ее температуре T в полусферу исходит поток энергии в единицу времени, пропорциональный четвёртой степени T. Константа зависит от свойств поверхности. Для так называемого «абсолютно черного тела» (нацело поглощает излучение любой длины волны) константа σ называемой постоянной Стефана.

Второй закон – закон Планка. Он описывает как именно распределяется излучение абсолютно черного тела при заданной температуре T по длине волны. У этого распределения есть ярко выраженный максимум, есть спад в сторону более коротких волн, есть спад в сторону более длинных волн.

Ну, а что же делать, когда рассматриваемое тело НЕ есть абсолютно черное? На эту тему есть закон Кирхгофа. Любое тело, так сказать, как поглощает, так и излучает. Если оно на какой-то длине волны поглощает только половину потока, то при излучении при этой же температуре оно будет излучать на этой длине волны тоже половину потока, соответствующего черному телу в силу закона Планка. Т.е. свойства тел поглощать и испускать излучение одинаковы.

Вот на этом слайде (см. слайд 23) приведено распределение потока солнечного излучения по длине волны (ось абсцисс). По оси ординат - спектральная яркость, т.е. мощность потока излучения в расчете на единицу длины волны. Видно, что максимум – примерно на 500 нм, т. е. на 0.5 мк. А дальше при больших длинах волн это быстро падает; после 3 мк практически ничего к Земле не приходит. Это – не расчетная, а экспериментальная кривая.

А вот это (слайд 24) – земное излучение: тело, у которого 288.15 К средняя температура. Напротив, у этого тела излучение только начинается с 3 мкм. Солнечное практически все приходит в диапазоне до 3 мк, а земное – начинается с 3 мкм, т. е. Земля излучает абсолютно в другом диапазоне.

Вот эта картинка очень выразительная (см. слайд 25). Это результат такого мысленного эксперимента – мы пожили источник монохроматического излучения на земную поверхность, направили луч вертикально и на верхней границе атмосферы измеряем: какой процент исходного потока, НЕ взаимодействуя с атмосферой, дойдёт туда. А сколько, наоборот, поглотится. По оси абсцисс – длина волны, по оси ординат - часть, которая поглотится в процентах. Видно, что, если посмотреть на диапазон, который соответствует видимому излучению, водяной пар плохо поглощает, сумма O_2 и O_3 слегка поглощает, а CO_2 совсем не поглощает. Т. е. практически солнечный свет поглощается атмосферой Земли плохо.

И совсем по-другому идут дела, когда мы движемся в сторону более длинных волн. Тут, правда, возникают некие «дырки» в спектре: подвинемся немного - мало будет абсорбировать, подвинемся ещё – очень хорошо будет абсорбировать, потом опять мало, т. е. «окна» чередуются с «глухой стенкой». Но правее 10 мк просто всё будет нацело поглощаться.

Мы говорили о том, что солнечный свет почти не поглощается атмосферой. Это означает на бытовом уровне, что солнечным светом практически нельзя нагреть воздух. Чтобы нагреть, нужно чтобы молекулы быстрее забегали. Поскольку солнечный свет почти не взаимодействует с этими молекулами, нагреть нельзя.

Более того, выясняется (на слайде 25 мы это видели в отношении кислорода), что и инфракрасное излучение с такими газами, как азот и кислород, тоже не взаимодействуют. Вот этот человек (см. слайд 26), Джон Тиндалл, в середине 19 века в эксперименте обнаружил, что те газы, которые составляют 99% содержания атмосферы, азот и кислород, практически не взаимодействуют и с земным, инфракрасным излучением. То есть и земное, инфракрасное излучение не могло бы их нагреть (слайд 27). И только <1% состава атмосферного воздуха – водяной пар, CO_2, метан, закись азота и некоторые

другие – хорошо поглощают земное излучение. Они от этого разогреваются, т.е. молекулы начинают быстрее двигаться, а потом уже путём столкновений передают кинетическую энергию молекулам всех других газов. Конечно, результат Дж. Тиндалла был очень высоким достижением для середины 19 века.

Если убрать атмосферу, то температурный режим земной поверхности станет чрезвычайно суровым. На слайде 28 приведен расчет, что было бы с температурой земной поверхности, если бы мы убрали атмосферу. Среднее альбедо земной поверхности, судя по слайду 29, равно 0.125. Если оно будет сохраняться в отсутствии атмосферы, то земная поверхность поглощала бы $(1 – 0.125) \cdot 341 = 298.38$ Вт м$^{-2}$ и излучала бы в равновесии в космос в инфракрасном диапазоне столько же. А сейчас она излучает 396 Вт м$^{-2}$. Сегодняшнюю температуру земной поверхности мы знаем, 288 K. Поскольку отношение излучаемых потоков должно быть равно отношению значений температуры в четвертой степени (см. слайд 28), то искомая температура земной поверхности в отсутствие атмосферы есть 268 K. Т.е. было бы на 20 градусов холоднее.

Частичное возвращение к Земле поглощенного атмосферой инфракрасного потока, излучаемого земной поверхностью (см. слайд 29), дополнительно обогревает Землю, что делает наше существование несколько более комфортным. Покажу это ещё раз с помощью простейшей демонстрационной модели (см. слайд 30, левая часть). Посмотрите на левую панель, где изображен случай отсутствия атмосферы. На поверхность Земли (пусть это черное тело) приходит поток солнечного излучения S. После установления термодинамического равновесия обратный поток L_0 инфракрасного излучения, излучаемого земной поверхностью в космос, должен быть равен S. Они одинаковы. Из уравнения $L_0 = \sigma T_0^4$ (это закон Стефана-Больцмана) находится температура T_0.

Теперь давайте поместим над земной поверхностью тонкую атмосферу (слайд 30, правая часть) и сделаем её абсолютно прозрачной для солнечного излучения. Приходит солнечное излучение, нагревает земную поверхность. Получается поток инфракрасного излучения земной поверхности L_0, который, пусть, нацело поглощается атмосферой. Атмосфера же излучает одинаковые инфракрасные потоки L_1 обратно к земной поверхности и в космос (одинаковые, поскольку атмосфера «тонкая» по допущению). Равновесные потоки легко рассчитываются. Чтобы не нагревалась и не остывала система «земная поверхность + атмосфера» должно быть $S = L_1$. А чтобы не нагревалась и не остывала земная поверхность должно быть $L_0 = S + L_1 = 2S$. Таким образом, в равновесии, при наличии атмосферы поток инфракрасного излучения земной поверхности будет вдвое больше, чем в отсутствие атмосферы. Соответственно, температура земной поверхности в первом случае будет в

$(2)^{1/4}$ раза больше, чем во втором. **ЭТО И ЕСТЬ ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ** в данном простейшем случае[1].

На слайде 31 изображен случай с N атмосферными слоями, каждый из которых непрозрачен для инфракрасного излучения. В состоянии равновесия поток инфракрасного излучения с земной поверхности L_0 равен $(N + 1)S$. Тем самым, возникает впечатление, что, увеличивая число слоев можно сколь угодно увеличивать этот поток и, соответственно, температуру земной поверхности. Но варить сталь таким путем не получится, поскольку – напомню – мощность приходящего от Солнца на верхнюю границу атмосферы потока всего 341 Вт м$^{-2}$.

Если же речь идет не об абстрактных слоях, а о реальной атмосфере, то, по мере того, как мы будем выделять в атмосфере всё более тонкие слои, они будут становиться все боле прозрачными, и модель с непрозрачными слоями, приведенная на слайде 31, станет неприложимой.

Давайте, теперь, проведем аналогичный расчет для атмосферы, которая, по-прежнему, не рассеивает солнечное излучение, но непрерывно распределена по вертикали (слайд 32). Вместо переменной высоты будем употреблять массу M столба воздуха над единицей земной поверхности до данной высоты. Полная масса столба атмосферы M_0. Восходящий и нисходящий потоки инфракрасного излучения будут обозначаться J со стрелками вверх и вниз соответственно. Поток солнечного излучения (для которого, напомню, атмосфера прозрачна в этой модели) – S, а $w(M)$ – коэффициент поглощения для атмосферного слоя единичной толщины. Приведенные на слайде 32 уравнения для равновесных потоков можно решить в явном виде – см. слайд 33. На картинке изображен вертикальный профиль восходящего потока инфракрасного излучения для случая, т.е. когда коэффициент поглощения w не зависит от высоты. Хорошо видно, что на верхней границе уходящий в космос инфракрасный поток всегда равен приходящему солнечному. При этом, при росте w градиент $J^{\uparrow}$ по высоте M становится все **круче**. <u>Это – проявление парникового эффекта для рассматриваемого случая «непрерывной по высоте атмосферы»</u>. На слайде 33 написано, что w пропорционально содержанию c «парниковых веществ» в атмосфере, но линейность здесь совершенно не обязательна. Достаточно, чтобы w не зависел от M и увеличивался с ростом c.

Теперь было бы полезно привести определение парникового эффекта – см. слайд 34. Конечно, это - не определение в математическом понимании, это пояснение скорее.

Я не хотел бы здесь много говорить о наших собственных работах, но скажу только несколько слов на эту тему. Мы с И. О. Поповым проделали следующую операцию: «разрезали» средний столб атмосферы над 1 м^2 на 10 000 слоев одинаковой массы. При этом использовалась американская

---

[1] Тот, кто бывал в турпоходах, хорошо знает, что одно дело, когда греешься у костра, и на тебя идёт поток тепла только от костра. И другое дело, когда находишься между костром и вертикальным брезентовым экраном. Тогда становится гораздо теплее.

стандартная атмосфера 1970-х годов. Для расчетов была использована одномерная горизонтально-однородная модель. Модельные допущения приведены на слайдах 35 – 37. Коэффициенты поглощения мы брали из спектроскопической базы HITRAN, а также из публикаций группы И. Л. Кароля. Это база (HITRAN), в которую все спектроскописты мира складывают результаты своих измерений того, как газы поглощают излучение таких-то длин волн.

В модели мы рассмотрели много спектральных диапазонов. У нас модель формально была не сложная, но диапазоны были узкие, и каждый диапазон считался отдельно. Зачем это делалось? Если посмотреть на спектр водяного пара (слайд 36), то хорошо видно, что коэффициент поглощения меняется на порядок и больше при малейшем шевелении длины волны. Это означает, что мы должны при расчетах очень подробно описывать спектр. Однако этот процесс как-то должен «сходиться», поскольку если взять очень-очень короткие диапазоны, то у нас там может не оказаться экспериментальных данных.

Рассматривались следующие газы: кислород (хотя его можно было и не рассматривать), водяной пар, CO_2, CH_4, N_2O, NO_2, O_3. Ещё раз повторяю: подробное (очень дробное) описание диапазонов использовалось потому, что рискованно употреблять обобщенный, осредненный коэффициент поглощения даже для близких значений длины волны. Если для двух рядом лежащих значений принять средний коэффициент поглощения, то можно получить очень большие ошибки при расчетах потоков и температуры. Причем ошибки в большую сторону – теплее будет, чем на самом деле.

Я не намерен сейчас рассказывать о том, как устроена модель. Это опубликовано, это можно прочитать:

Семенов С. М., Попов И.О. Радиационно-равновесный профиль температуры в атмосфере Земли. В кн.: *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. Т. XXIII. Москва, ИГКЭ, 2010.

Семенов С. М., Попов И.О. Сравнительные оценки влияния изменения концентраций диоксида углерода, метана, закиси азота и водяного пара на радиационно-равновесную температуру земной поверхности. *Метеорология и гидрология*, N 8, 2011.

Семенов С.М. Парниковый эффект и его антропогенное усиление. *Солнечно-земная физика*. Вып. 21, 2012.

В результате модельного расчета получился, в частности, вертикальный радиационно-равновесный профиль температуры. Он чудесным образом дал температуру в тропопаузе такую, какая есть реально – около 210 – 213 градусов. Температура у земной поверхности, естественно, оказалась завышенной. Ведь радиационная модель не учитывает никакие процессы, которые уносят энергию с земной поверхности, кроме радиационных. Потоки явного и скры-

того тепла от земной поверхности не учитывались. Это, конечно, снизило бы температуру в приповерхностном слое.

От распределения радиационно-равновесной температуры по номеру слоя, приведенному на слайде 38, т.е. фактически по «высоте», измеряемой массой столба воздуха «под этой высотой», можно перейти к распределению по обычной, геометрической высоте с помощью уравнения состояния идеального газа.

Некоторые коллеги при обсуждениях задавали **вопрос** о цели этих наших расчетов. Ведь уже в классической работе Манабе и Уэзеролда (Manabe S., Wetherald R. T. 1967. Thermal equilibrium in the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 24, No 3, pp. 241–259) и в более ранней работе Манабе и Стриклера (Manabe S., Strickler R. F. 1964. Thermal Equilibrium in the Atmosphere with a Convective Adjustment. *Journal of the Atmospheric Sciences*. July, 1964, pp. 361-385), на которой первая в значительной степени основана, делались расчеты вертикального профиля температуры для стандартной атмосферы, даже с учетом и конвекции. **Наша цель была следующая: явно выделить радиационную часть эффекта присутствия парниковых газов в атмосфере.** В распоряжении классиков не было подробной спектроскопической базы данных, которая позволяла бы вести расчет для узких диапазонов длин волн. Они оперировали абстракциями, обобщенными понятиями - «коротковолновым излучениям» и «длинноволновым излучением». Но осреднение коэффициентов поглощения при существенной изменчивости по длине волны ведет к большим погрешностям, о чем мы выше уже говорили. **Кроме того**: ранее в русскоязычной литературе не было опубликовано результатов расчетов, аналогичных нашим. В момент, когда появлялись очень острые заявления в некоторых изданиях в 2000-х годах, вообще отрицающие роль обогащения атмосферы парниковыми газами в современном глобально потеплении, не было возможности даже сослаться на русскоязычные публикации с прямыми расчетными оценками антропогенного усиления парникового эффекта. **Наши работы 2010-2012 гг. восполнили этот пробел**.

С моделью мы провели различные численные эксперименты. В частности, мы добавляли или же изымали из модельной атмосферы определенное количество парниковых газов, чтобы проследить изменения температуры. Например, на слайде 39 представлена зависимость радиационно-равновесной температуры земной поверхности от концентрации CO_2, полученная с помощью нашей спектральной радиационной модели, использующей современные спектроскопические данные; нуль соответствует значениям в 1970 г. Заметим, что полное изъятие углекислого газа из атмосферы вызывает очень заметное снижение температуры. А вот увеличение его концентрации до примерно 660 ppm приводит к увеличению температуры лишь на 1.5 градуса.

На слайде 40 приведены результаты расчета чувствительности температуры к увеличению содержания парниковых газов в атмосфере. Причем, расчет проводился в двух вариантах: для малых приращений концентраций

(чувствительность оценивалась как $\Delta T / \Delta c$) и для больших - увеличения концентрации в десять раз. Заметим, что для малых приращений лидирует закись азота N_2O, а для больших все же CO_2 (в этом случае оценка для водяного пара не проводилась).

На слайде 41 приведен график, характеризующий современные антропогенные выбросы основных парниковых газов в атмосферу, а на слайде 42 - концентрации углекислого газа, метана и закиси азота. Видно, что они практически монотонно растут.

Тут возникает сразу вопрос, который часто задают: а как это так получается, что концентрации растут монотонно, практически без спадов, а температура - со спадами, с колебаниями (см. слайд 43)? Ведь если температура зависит от концентраций парниковых газов, то она должна также расти без спадов. Противоречие?

Но противоречия здесь на самом деле нет. Концентрация парниковых газов – это фактор, который влияет на температуру. Но то, что мы наблюдаем по температуре (слайд 43) - результат действия многих факторов, а не только роста содержания парниковых газов в атмосфере.

Чтобы пояснить ситуацию, я такой пример привёл (слайд 44). Мы на одинаковый линейный тренд $0.002t$, где t - время в годах, наложили тридцатилетние колебания с разной амплитудой - 0.005, 0.1 и 0.5. Когда амплитуда маленькая, то мы наблюдаем практически всё тот же тренд (красная линия). Когда амплитуда выросла до 0.1, мы видим, что есть периоды, когда рост быстрее, чем у линейной функции, и когда он медленнее (синяя линяя). Даже есть отрезки, где рост временно прекращается. А когда мы ещё увеличили амплитуду до 0.5, появились временные спады и быстрые подъёмы. Это не мешает росту температуры в вековом диапазоне, в вековом масштабе времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ***Радиационные факторы - процессы рассеяния, поглощения и излучения - доминируют в формировании климата Земли.***

- ***В базовом, <u>естественном</u> парниковом эффекте основную роль играют водяной пар H_2O и углекислый газ CO_2.***

- ***Рост концентрации углекислого газа - главная причина <u>антропогенного</u> усиления парникового эффекта. Метан и закись азота имеют меньшее значение.***

- ***Потенциал CO_2, CH_4 и N_2O в отношении усиления парникового эффекта <u>был значительным и остается заметным</u>.***

- ***Дальнейший рост концентрации CO_2 будет иметь заметно все меньшее значение в аспекте усиления парникового эффекта.***

- ***При увеличении содержания парниковых газов действие естественных факторов (<u>пока не полностью изученных</u>) может временно компенсировать потепление и даже привести к временному похолоданию (что уже наблюдалось в XX веке и начале XXI века).***

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ.