

Семинар Института глобального климата и экологии
Росгидромета и РАН (ИГКЭ)

30 октября 2015 года

SUMMARY

(составлено А. М. Трифионовой-Яковлевой, Институт географии РАН)

Д.ф.-м.н. ВОЛОДИН Евгений Михайлович (Институт вычислительной математики РАН) продолжил представление доклада **«ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПОТОКОВ ТЕПЛА, ВЛАГИ И ИМПУЛЬСА В КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ. НЕРАДИАЦИОННЫЕ ПОТОКИ»**. Председательствовал С.М. Семенов.

Семенов С.М., председательствующий: В прошлый раз мы несколько неправильно рассчитали время для заседания. В результате не хватило времени рассмотреть вопросы переноса влаги. Сегодня Евгений Михайлович Володин продолжит свой доклад.

Пока устанавливается презентация, задам несколько философский вопрос. Что такое «поток энергии»?

Мы хорошо представляем себе, что такое поток массы. У нас есть сплошная среда – газ или жидкость. В каждой точке есть вектор переноса массы, определяющий направление скорости частиц. Мы берем единичную площадку, перпендикулярную этому вектору, и можем проделать следующую операцию: покрасить в красный цвет частицы до этой площадки («до» определяется направлением переноса), подождать какое-то время Δt и посмотреть, сколько этих частиц окажется за площадкой. Считаем, что остальные частицы бесцветные. Если число красных частиц, подсчитанное таким образом для единичной площадки разделить на малое время Δt , то это будет поток массы.

А что такое «поток энергии»? Ведь энергия – это не частицы в среде. В некоторых случаях есть аналогии с частицами, например, когда речь идет о лучистой энергии (световой поток можно себе представлять в некотором смысле как поток частиц - фотонов). А вот когда мы говорим о нерадиационном потоке тепла, что такое поток тепла? Мы можем обращаться с ним, как с потоком массы? Или это некоторая абстракция, просто помогающая вести расчеты?

Володин Е.М.: На самом деле, когда поток энергии сопряжен с потоком чего-то материального, то тогда можно.

Семенов С.М.: Но в этом случае может возникнуть невязка, вследствие перехода одного вида энергии в другой. В атмосфере, например, есть энергия

лучистая, кинетическая, потенциальная, и эти виды энергии могут переходить друг в друга. Вот когда, например, происходит увеличение объема массы воздуха, поднимающейся вверх при конвекции, это воспринимается Вами как поток энергии?

Володин Е.М.: Если энергия тепловая, то поток ее может быть вызван потоком частиц. Это одно. Но может быть так, что, в среднем, никакого потока массы нет, а поток энергии есть. Примером могут служить поверхностные волны на воде.

Семенов С.М.: *Энергия, которая переносится вертикально при помощи теплых пузырей воздуха (термики) - это просто кинетическая энергия более теплых молекул у поверхности Земли, которые смешиваются в вышележащих атмосферных слоях со своими более холодными собратьями, или это что-то большее? При конвекции переносится только внутренняя энергия или еще какая-то энергия, связанная с расширением/сжатием воздушных масс?*

Володин Е.М.: В конечном счете, это внутренняя энергия.

Семенов С.М., председательствующий: Спасибо. Давайте закончим философское отступление. Пожалуйста, Евгений Михайлович, Вы сегодня намеревались рассказать о переносе влаги, о том, как это описывается в современных моделях климата.

Володин Е.М.: Итак, мы продолжаем рассмотрение того, как устроены модели климата, и я напому, что они состоят из многих частей, многих блоков. Из всего, что существует в модели климата, мы рассматриваем только общую циркуляцию атмосферы, а в ней в прошлый раз рассматривали параметризацию турбулентности в пограничном слое атмосферы, потоки с земной поверхности (в том числе, покрытой растительностью). Теперь мы рассмотрим перенос влаги, в том числе параметризацию конвекции и конденсации. Наблюдаемое выпадение осадков из атмосферы, можно подразделить на два вида явлений: крупномасштабная конденсация и влажная конвекция. В соответствующих записях на метеорологических станциях будет значиться «дождь» или «ливень». Проще говоря, обложной идет в результате крупномасштабной конденсации, а сильный дождь - в результате конвекции. Эти явления по-разному описываются в моделях атмосферы, тем более что они имеют совсем разные характерные пространственный и временной масштабы.

Крупномасштабная конденсация заключается в том, что большой объем воздуха с характерными размерами в десятки или сотни километров поднимается, движется вверх в более холодные слои атмосферы, от чего охлаждается, и излишки воды выпадают. В моделях это описывается просто: если

есть некий объем воздуха, и оказалось, что влажный воздух там перенасыщен влагой (т.е. парциальное давление водяного пара превышает давление насыщения при данной температуре), то избыток влаги выпадает в виде осадков. Такая схема была реализована сразу же, как только появились модели циркуляции атмосферы, когда это позволила вычислительная техника, в 1950х-1960х годах. Если бы при этом не выделялось скрытое тепло, то весь избыток влаги выпал бы в виде осадков. Ну а поскольку при конденсации водяного пара тепло выделяется, то выпадает несколько меньшее количество, а температура в рассматриваемом объеме воздуха несколько увеличивается.

Иногда возникает ситуация, когда в рассматриваемом объеме воздуха влажность близка к насыщенной, причем при подъеме этого объема воздуха (см. выше) температура в окружающей среде падает с высотой быстрее, чем влажноадиабатический градиент. В этом случае на такой объем воздуха всегда будет действовать архимедова сила, и он может безостановочно подниматься вверх (даже все быстрее и быстрее с течением времени, если, конечно, трение не стабилизирует скорость подъема). Это связано с тем, что, с учетом выделяемого при конденсации тепла рассматриваемый объем воздуха будет всегда теплее окружающего воздуха, и, стало быть, менее плотным, что и порождает архимедову подъемную силу.

Семенов С.М.(ИГКЭ): То есть это такой «двигатель». За счет того, что происходит конденсация, выделяется тепло, и это делает рассматриваемый объем воздуха всегда менее плотным, чем окружающий воздух, что и обеспечивает подъемную силу.

Володин Е.М.: Да. И то, что обычно видит при этом наблюдатель, это кучевые облака, отдельные или скопления. Их характерный размер может быть от сотен метров до нескольких десятков километров. Это есть влажная конвекция.

Понятно, что мы не можем ее прямо смоделировать, если у нас размер пространственной ячейки больше, чем размер такого кучевого облака. А для большинства моделей климата, да и глобального прогноза погоды, это до сих пор так. Даже при огромном прогрессе вычислительной техники явно разрешить конвекцию мы не можем, а, значит, ее надо как-то параметризовать.

Ну и самая первая параметризация, которая была придумана на заре развития атмосферных моделей, это так называемое влажно-конвективное приспособление. Влажная конвекция работает до тех пор, когда градиент температуры становится равен влажноадиабатическому градиенту. Это самая простая параметризация влажной конвекции.

Продуктом конденсации является облачность. Она очень важна для формирования радиационного бюджета Земли, для того, чтобы правильно вычислять радиационные потоки и вообще потоки тепла на Земле. Поэтому облачность – это очень важно. А как ее вычислить? Первые способы вычисления облачности были следующие.

Если модель имеет настолько мелкое разрешение, что позволяет описывать отдельные облака, то можно поступить очень просто. Написать, что если в какой-то ячейке влажность равна 100% (т.е. наблюдается насыщение водяным паром), то ее полностью занимают облака. А если влажность меньше 100%, то в ячейке облаков нет.

Но если ячейка большая, порядка сто на сто километров, то мы так поступить не сможем. Понятно, что какое-то количество облаков на данной территории будет наблюдаться, даже если относительная влажность заметно меньше единицы ($< 100\%$), потому что распределение влажности неоднородно. Чтобы вычислить, какой будет облачность в этом случае, нужно задаться какой-то функцией распределения влажности, например, распределения относительной влажности в этой ячейке. Если мы задались ею, то можно применить следующую схему расчета:

- когда относительная влажность меньше, чем некоторая критическая, то тогда облачность равна нулю;
- когда относительная влажность больше другого критического значения, то облачность равна единице;
- при относительной влажности в промежутке между этими критическими значениями облачность будет некоторой функцией относительной влажности, и вид этой функции будет зависеть от того распределения, которое было принято.

То есть если мы считаем, что эта функция равна константе, то есть в некотором промежутке относительная влажность занимает весь диапазон возможных значений, от некоторого минимального до некоторого максимального, так, чтобы в сумме в среднем она была той, что дает нам модель в данном узле сетки, то это будет тогда линейная функция. То есть балл облачности будет равен нулю при влажности меньше критической, затем линейный рост, и дальше единица при относительной влажности больше некоторой.

Если мы зададимся другой функцией распределения влажности, то эта зависимость будет другой. На самом деле, прямые измерения функции распределения очень трудны, потому что характерный размер флуктуаций очень маленький, порядка размера самого облака, то есть порядка нескольких сот метров. Поэтому, для прямой оценки функции распределения, надо на площади примерно сто на сто километров через каждые несколько сот метров измерять относительную влажность, причем не у земной поверхности, а на некоторой высоте, что вряд ли делалось когда-либо хоть раз.

Вследствие этого существует произвол в выборе функции распределения. И этот произвол не удастся уменьшить никакими мыслимыми способами. И, как мы увидим, в конечном счете, этот произвол приводит к тому, что климатические модели имеют разную чувствительность к одному и тому же внешнему воздействию, потому что облака в них реагируют по-разному на это внешнее воздействие.

Еще одна величина, которую надо учитывать в моделях переноса влаги в атмосфере, это водность облака. То есть, кроме того, что облако занимает некоторую часть пространства (ячейки), еще важно знать, сколько там содержится воды в виде капель. Самый простой способ это сделать – взять некоторую зависимость, полученную из измерений. Это делается так: в различных видах облаков летают самолеты, на которых есть приборы, которые могут «видеть» водность; так собираются данные, которые затем некоторым способом обобщаются в виде зависимости водности от температуры или давления. Есть книги, например, Матвеев Л.Т. «Динамика облаков», где такие зависимости водности от температуры и давления можно найти. Но понятно, что единого способа обобщить такие данные нет, да и быть не может. Поэтому в литературе можно увидеть не только данные с разными коэффициентами, но и разного типа: экспоненциальные, степенные и т.д. Хорошего единого способа вычислить водность облака нет. А водность тоже нужна для вычисления радиации.

Есть и другие сложности. Например, при параметризации влажной конвекции нам, фактически, нужно найти четыре переменные. У нас есть два уровня, и на каждом уровне есть температура и влажность, и нужно найти две температуры и две влажности после работы конвекции, а уравнение у нас только одно: вертикальный градиент температуры равен влажноадиабатическому. Хорошо бы написать четыре уравнения. Одно у нас есть, а еще одно – это закон сохранения энергии, записанный для двух уровней сразу. Но это все равно еще одно уравнение. А вот оставшиеся два уравнения строгим способом взять неоткуда, они в достаточной степени произвольные. Например, что относительная влажность после работы конвекции равна чему-то, и это значение, вообще говоря, произвольное. И от этого будет зависеть то, как работает модель атмосферы в целом!

Еще один пример того, что такой подход в некоторой ситуации приводит к не очень хорошим результатам. Здесь нарисована (слайд 21) некоторая среднеклиматическая облачность по данным некоторой модели атмосферы, которая считалась несколько лет. И процент облачности, осредненный по всем ячейкам представлен здесь. Нужно обратить внимание, что на картинке в некоторых районах, например, на востоке тропической части Тихого океана, облаков практически нет, меньше десяти процентов, а наблюдается облаков довольно много, больше, чем пятьдесят процентов. Это происходит потому, что здесь, действительно, вроде бы условий для образования облачности нет, здесь почти все время нисходящее движение. Практически весь столб безоблачный, кроме узкой полосы на верхней границе пограничного слоя, где и сосредоточена вся облачность, порядка семидесяти процентов, на высоте от пятисот до тысячи метров. И такая облачность при рассматриваемом подходе описывается очень плохо, точнее здесь видно, что не получается совсем.

Время от времени такая ситуация складывается везде. И над Москвой может быть такое, что антициклон, и почти вся атмосфера безоблачная, кро-

ме узкого слоя у земной поверхности, где облака есть. И если в модели получается, что их нет, то понятно, что и погода, которая будет получаться в модели, будет сильно отличаться от наблюдаемой.

Таким образом, недостатки простейшей параметризации были осознаны, и встал вопрос, что делать и какие более сложные параметризации предложить. Нужно сказать, что все равно единого и общепризнанного решения было не найдено. Но, тем не менее, некий подход был найден и предложен Тидтке (Tiedtke), который работал в европейском центре прогнозов погоды и поставил перед собой цель улучшить прогноз. Подход был предложен следующий.

Рассматриваются образования облаков трех типов: слоистые облака, облака глубокой конвекции и облака пограничного слоя. Сейчас доступна трехмерная климатология облачности, которая меряется со спутников, не просто общий балл, а распределение по высоте. Найти этот проект можно в интернете, он называется Callipso.

В работе Тидтке 1993-го года решаются прогностические уравнения еще для двух переменных, для балла облачности и водности облаков. В этом прогностическом уравнении несколько слагаемых: адвекция, перенос, источники, связанные с конвекцией, с пограничным слоем, с конденсацией и с диссипацией вследствие испарения облаков. Я озвучу основной принцип получения этих формул. Также в уравнениях для удельной влажности и для тепловой энергии, появляются дополнительные слагаемые, такие как конденсация и испарение.

Начнем с описания слагаемых, связанных с конвекцией. Заодно обсудим некоторые идеи параметризации конвекции. Рассмотрим пример влажной конвекции. Здесь изображено несколько облаков (слайд 26). Одно из них жило уже достаточно времени, а это только развивается. Согласно рассматриваемому подходу, надо оценить поток массы, порождаемой влажной конвекцией. Прежде всего, это поток, направленный вверх, потому что, исходя из наших рассуждений, объем воздуха при определенных обстоятельствах может подниматься вверх, и тогда происходит конденсация и дальнейшее развитие конвективной неустойчивости. Но наблюдения показывают, что в развитом облаке существует и движение вниз тоже. Они связаны с тем, что если дождь идет достаточно сильно и достаточно долго, то просто исходя из молекулярной вязкости, он увлекает частицы воздуха вниз, и этим вызывает нисходящее движение. Ну и то, что капли испаряются, тоже вызывает влажную неустойчивость, но наоборот, когда капли испаряются, и воздух из-за испарения оказывается холоднее окружающего. Но при этом, если схематически представить себе такое конвективное облако (слайд 27), то ветер переносит его слева направо и в передней части облака обычно наблюдается восходящее движение, поток восходящего воздуха, который надо, исходя из некоторых соображений, оценить. В задней части облака нисходящее движение. А растекаясь, восходящее движение образует так называемую «наковальню». Это и есть основной механизм образования конвективных облаков.

Наблюдения показывают, что, при осреднении по всему облаку, поток массы восходящего движения сначала маленький, потом в восходящие частицы воздуха вовлекаются новые и новые, поток достигает некоторого значения, и вверху поток растекается и замедляется. А нисходящий поток по величине в среднем занимает половину, от интенсивности восходящего потока. Но это в среднем, а, на самом деле, если облако растет, то, в основном, имеют место восходящие движения, а если оно разрушается, то нисходящие. И, исходя из некоторых соображений, этот поток восходящих движений потом оценивается. Некоторые соображения для получения формулы оценки связаны с тем, что рассматриваются начальные пузырьки воздуха разных размеров, затем считается, что эти пузырьки воздуха поднимаются, и по-разному вовлекают в себя окружающий воздух, то есть чем больше пузырек, тем относительная доля вовлечения меньше, поскольку площадь поверхности растет пропорционально квадрату размера, а объем пропорционально кубу. А маленькие пузырьки смешиваются с окружением, наоборот, легко. И после все интегрируется по всем допустимым размерам, и получается некий восходящий поток воздуха. Исходя из некоторых соображений, пишется уравнения для нисходящего воздуха. А дальше в уравнения для температуры и влаги входят такие слагаемые, как дивергенция потока восходящего воздуха, умноженная на соответствующую величину, соответствующее слагаемое для нисходящих движений, и слагаемые для окружения, такие, чтобы масса ни вверху, ни внизу не накапливалась.

Эта идея потока массы сейчас является центральной и при параметризации влажной конвекции, и она используется в огромном количестве модификаций.

А дальше нам нужно оценить слагаемое - вклад в водность облака от процессов, связанных с глубокой конвекцией. Он записывается так, что изменение водности облаков равно скорости растекания поднимающихся движений умножить на водность тех облаков, которые при этом подъеме образовались. Доля объема, занимаемая этим облаком, увеличится на объем того воздуха, который поднялся. Считается, что весь поднявшийся воздух является облачным.

Облачность на верхней границе пограничного слоя при этом подходе рассчитывается таким образом: сначала неким образом оценивается поток массы в восходящих движениях, порожденных турбулентностью в пограничном слое, затем считается, что, при выполнении некоторых условий, весь поток массы является облачным, и облачность увеличится ровно на объем поднявшегося воздуха.

Теперь об образовании крупномасштабных облаков. Сначала вычислим то, насколько насыщенная влажность воздуха в некотором его объеме изменяется со временем. Это изменение определяется двумя слагаемыми (слайд 30, нижняя формула): первое связано с тем, что рассматриваемый объем воздуха поднимается и адиабатически охлаждается, а второе слагаемое учитывает действие некоторых источников тепла. Если изменение влажности отри-

цательно, то скорость конденсации подразделяется на две: на конденсацию в уже существующих облаках, и образование новых.

Если некий объем воздуха поднимается, то конденсация в уже существующих облаках равна доле имеющихся облаков, умноженной на скорость изменения влажности. Тогда можно оценить изменение площади облаков, предварительно предположив распределение влаги в облачной части. Здесь предполагается, что распределение будет равномерным. Кроме этого, считается, что облака, образовавшиеся одним из трех способов, могут испаряться в результате либо крупномасштабного опускания воздуха, либо в результате перемешивания облака с окружающим ненасыщенным воздухом. Это испарение может быть соответствующим образом учтено в формулах.

Затем, когда происходит конденсация, газообразная влага переходит в облачную влагу, из которой выпадают осадки в соответствии с некоторым эмпирическим выражением, учитывающим некое критическое значение влажности, характерное время, тип облаков и, по сути, являющимся обобщением наблюдений.

Таким образом, это лишь один из способов представить параметризацию конвекции, далеко не самый сложный из тех, которые придумали. Альтернативные способы параметризации глубокой конвекции состоят в том, например, что модифицируется влажно-конвективное приспособление (которое исходно было очень простым) тем, что измеряются профили температуры и влажности, а после обобщаются. Исходя из этого, вычисляется некоторый референсный профиль температуры и влажности, и получаемые профили «притягиваются» к нему с неким характерным временем.

Можно было бы несколько часов рассказывать о других параметризациях конвекции, вплоть до того, что предлагается так называемая суперпараметризация. Предполагается, что у нас есть некоторая климатическая модель с характерным размером ячейки порядка ста километров. В каждую ячейку сетки вставляется маленькая модель с таким пространственным разрешением, чтобы каждое облако описывалось явно. Такой подход чрезвычайно дорог с точки зрения вычислительных ресурсов.

Дальше приведем некоторые результаты того, что получается, если применить вышеописанный подход. На картинке видно (слайд 36), что те же явления, что наблюдаются в природе, наблюдаются и в результатах моделирования: облачность пограничного слоя, облачность глубокой конвекции, слоистая облачность. На слайдах 38-40 представлены различные виды источников тепла в атмосфере: явное тепло, выделение скрытого тепла при крупномасштабной конденсации и глубокой конвекции. Пример среднеклиматических осадков в модели (слайд 41). При сравнении результатов моделирования с наблюдениями видно, что в среднем осадков немножко больше в результатах моделирования. И второй момент состоит в том, что в модели в тропиках Тихого океана и Атлантического океана осадки почти симметрично выпадают относительно экватора, асимметрия не очень большая. А наблюда-

ется не так. Реально почти все осадки выпадают севернее экватора. Эта проблема несоответствия и сейчас не решена.

Разные подходы к параметризации приводят к тому, что чувствительность моделей к изменению содержания углекислого газа разная, так как облака по-разному реагируют на изменение. В более чувствительных климатических моделях, облачность при потеплении уменьшается. И это создает положительную обратную связь, что и увеличивает глобальное потепление. А как должно быть в природе – пока неизвестно. На этом все, спасибо за внимание.

Семенов С.М., председательствующий: Спасибо. Какие вопросы?

Громов С.А. (ИГКЭ): Как вашу схему изменяет учет количества ядер конденсации?

Володин Е.М.: Во-первых, количество ядер конденсации влияет на размер облачной капли, который учитывается при расчете радиационных потоков. А в данной параметризации еще изменится характерное время перехода облачной влаги в осадки. Считается, что если ядер конденсации очень много, то быстро образуется много маленьких капель, которые живут дольше.

В модель включен аэрозольный блок. Считается количество различных аэрозолей и, в зависимости от количества аэрозолей мелкой фракции, которые могут выступать в роли ядер конденсации, вычисляется характерный размер капли и характерное время ее жизни.

Семенов С.М. (ИГКЭ): При ясной погоде, безоблачном небе где-то сложилась определенная температура земной поверхности. При появлении облака, под ним станет теплее или холоднее? Ведь, с одной стороны, оно ограничивает доступ солнечной радиации, а с другой стороны, усиливает парниковый эффект.

Володин Е.М.: Если облако среднестатистическое, и условия над и под ним среднестатистические, то оно охлаждает поверхность больше, чем нагревает. Радиационный форсинг от всех видов облаков отрицателен, он меряется со спутников. Но нижние облака охлаждают более эффективно, а верхние, наоборот, нагревают.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Говоря о влажной конвекции (рассматривались два уровня), Вы упоминали о четырех переменных и двух уравнениях для них. О чем это говорит? Что существующая физическая теория со всеми уравнениями не может быть разумно преобразована в машинные уравнения, или просто, что не существует полной теории?

Володин Е.М.: Это связано с тем, что мы решаем уравнения на грубой сетке, а хотим учитывать мелкомасштабное явление, глубокую конвекцию. Отсутствие других уравнений говорит о том, что математически точных параметризаций этого явления не существует.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Вы показывали вертикальные разрезы, характеризующие то, сколько энергии уходит с земной поверхности в виде явного тепла, в виде скрытого тепла, и где выделяется в атмосфере и то, и другое. Причем, Вы говорили «столько-то градусов в сутки». Это означает, что за некоторые сутки произошел нагрев, а потом это тепло сразу радиационно ушло в космос? Какова дальнейшая судьба этого тепла в моделях?

Володин Е.М.: То, что нагрелось, чем-то должно компенсироваться. Либо оно прямо здесь же излучилось в космос, либо сначала этот нагретый воздух переместился куда-то, и потом излучился.

Семенов С.М., председательствующий: Поблагодарим Евгения Михайловича за очень интересное сегодняшнее выступление, которое показало и значительный уровень достижений современных климатических моделей в описании процессов переноса влаги, и все еще существующие трудности, которые ожидают своего разрешения.