

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

**28 сентября 2015 года**

**SUMMARY**

(составлено В.Д. Смирновым, ИГКЭ)

Состоялся доклад д.ф.-м.н. **ВОЛОДИНА Евгения Михайловича** (Институт вычислительной математики РАН) **«ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПОТОКОВ ТЕПЛА, ВЛАГИ И ИМПУЛЬСА В КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ. НЕРАДИАЦИОННЫЕ ПОТОКИ»**. С развернутым комментарием выступил д.ф.-м.н. **ЕЛИСЕЕВ Алексей Викторович** (Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН). Председательствовал **С.М. Семенов**.

**Семенов С.М., председательствующий:** *Добрый день, уважаемые коллеги! Сегодня Евгений Михайлович Володин любезно откликнулся на наше предложение и просьбу рассказать о потоках тепла, влаги и импульса в климатических моделях. Почему я попросил Евгения Михайловича об этом рассказать? Все мы знаем, что сейчас большая часть информации, которая учитывается в разных обзорах, докладах, получена с помощью климатических моделей. Они самые разные - атмосферные, совместной циркуляции атмосферы и океана, модели полные, глобальные, модели сложности несколько уменьшенной и совсем простые модели, которые используются для расчетов, например, в экологических задачах, когда внимание направлено, в основном, на оценку влияния на экосистемы. Но вот для большинства людей эти модели все-таки некий черный ящик, такая коробочка, на вход которой подается некая информация, например, концентрации парниковых газов, их ход во времени, и модель что-то там считает, выдает траектории метеорологических величин по географической сетке с некоторым разрешением во времени. Но как устроена эта коробочка, мы не знаем, нет такого на свете произведения, сколько-нибудь доступного читателю, которое могло бы нам объяснить это в простых терминах. Читать техническое описание модели - практически невозможное дело, все это прекрасно знают, кто имел дело с моделированием. Поэтому нам бы хотелось постепенно, семинар за семинаром, понять, как устроены блоки этой модели, какие там есть упрощения, какие там учтены основные физические законы. Мы решили начать с самого простого, хотя, может быть, это и не очень простая вещь: как устроены нерадиационные потоки. Известно, что энергия, поступающая от Солнца в климатическую систему Земли в виде лучистой энергии, потом преобразуется в другие виды энергии, превращается в химическую, кинетическую, потенциальную (когда речь идет об увеличении*

давления), тепловую и т.д. В конце концов, все это неизбежно переходит в тепло и, в конечном счете, излучается обратно в космос. Так устанавливается энергетический баланс Земли.

Тема эта сложная, поэтому торопиться мы с этим рассмотрением не будем. Вот Евгений Михайлович любезно взялся рассказать о нерадиационных потоках, как устроены нерадиационные потоки тепла, влаги и импульса, т.е. как переносятся эти физические величины в климатической системе.

Алексей Викторович Елисеев любезно согласился ознакомиться с текстом расширенных тезисов докладчика и потом прокомментировать сам доклад.

*Пожалуйста, Евгений Михайлович.*

**Володин Е.М. выступает с докладом (текст доклада прилагается отдельным файлом).**

Семенов С.М., председательствующий: Спасибо большое. Какие вопросы есть к Евгению Михайловичу? Пожалуйста.

## **Вопросы/ответы**

Уваров А.Г. (ИГКЭ): Вот на этом графике, что - по оси абсцисс, что - по оси ординат?

Володин Е.М.: По вертикальной оси отложено давление в миллибарах. Вот, значит, 1000 - это поверхность. А здесь, по оси X - это потенциальная температура. Это стандартный профиль. Это, собственно, такой же профиль потенциальной температуры, как он был показан для "американского" летнего дня, только там был перемешанный слой, а здесь нет никакого перемешанного слоя.

Бардин М.Ю. (ИГКЭ): У меня такой вопрос, не совсем по теме. В Вашей модели при росте парниковых газов, что делается с Североатлантическим колебанием?

Володин Е.М.: Скажем так, изменения его индекса становятся чуть более положительными, но эти изменения небольшие.

Бардин М.Ю. (ИГКЭ): Становятся чуть более положительными?

Володин Е.М.: Несущественно.

Елисеев А.В. (ИФА РАН): Евгений Михайлович, скажите, пожалуйста, вот Вы показывали рисунок для осадков на востоке Украины по данным наблюдений и по двум моделям. Для региональной “английской” модели там граничные поля откуда брались?

Володин Е.М.: Они брались из модели ИВМ тоже, но граница была далеко, т.е. западная граница была там в Атлантике.

Елисеев А.В. (ИФА РАН): Так, может быть, одинаковое поведение осадков в летние месяцы частично может как-то объясняться тем, что эти крупномасштабные поля на границе были взяты из модели ИВМ, которая характеризуется вот этим “помещением” осадков в летние месяцы?

Володин Е.М.: Вряд ли, потому что я видел расчеты, где брались просто реанализы, и результат точно такой же. И летом очень важен локальный баланс влаги.

Егоров В.И. (ИГКЭ): Скажите, пожалуйста, Вы рассматриваете потоки от поверхности Земли ВВЕРХ, в частности, в районе пограничного слоя и в свободной атмосфере. А как учитывалось поглощение растительностью, почвой ТЕПЛА, это все-таки уже обратный поток?

Володин Е.М.: Нет, оно учитывалось автоматически. Здесь, в этих формулах, нигде не сказано, что поток должен быть направлен только в этом направлении. Это ведь нетто-поток.

Егоров В.И. (ИГКЭ): Видим ли мы разницу между потоком от поверхности Земли и потоком к Земле...

Володин Е.М.: А ее и нет.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Владимир Иванович, это нетто-поток уже.

Володин Е.М.: Просто, если вот в предыдущих формулах разница вот этих потенциальных температур имеет другой знак, то и поток будет иметь другой знак. Если в почве поверхность будет теплее, чем нижележащие слои, то в модели почва будет поглощать тепло.

Егоров В.И. (ИГКЭ): Я имею в виду не только почву, но и растительность... поглощение растительностью.

Володин Е.М.: Растительность в этой модели самостоятельной роли не играет. Она рассматривается совместно с почвой. Это – земная поверхность.

Егоров В.И. (ИГКЭ): Понятно, только почва.

Володин Е.М.: Ну да.

Семенов С.М., председательствующий: Спасибо, Владимир Иванович. Какие вопросы еще есть, пожалуйста?

Семенов С.М. (ИГКЭ): У меня есть вопросы, Евгений Михайлович. Как обстоят дела с потоком влаги с замерзшей поверхности? Это что, через воду? Т.е., сначала талая вода получается? ПОТОМ испарение? Как это вот моделируется?

Володин Е.М.: Формально он рассчитывается по той же формуле, которую мы видим вот здесь, четвертой..., где  $Q_s$  - это насыщенная влажность над льдом. Но практически, если поверхность замерзшая, то как его ни считай – поток будет очень маленький. Т.е., это не очень важно.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Вам не кажется, что здесь может быть важна чисто внутрисуточная динамика. Днем, когда происходит процесс таяния, и поверхность льда частично покрыта водой, испарение может быть достаточно интенсивным.

Володин Е.М.: В модели это все учитывается явно. Ведь временной шаг – 1 час.

Семенов С.М. (ИГКЭ): В общем, в модели есть лужи, короче говоря?

Володин Е.М.: Ну да. Снеготаяние есть.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Вот Вы говорили, что причины того, почему модели испарения дают неточные результаты (по сравнению с наблюдениями) не совсем ясны. Вы показали рисунки, где есть явные несовпадения. Вообще говоря, может быть, стандартной причиной несовпадений является следующая: формулы для испарения были получены в некотором одном диапазоне переменных, а их автоматически применяют ко всему диапазону, который встречается в модели, даже для тех точек, которые не были обеспечены данными исходно, т.е. проводилась экстраполяция. Может быть, проблема в том заключается, что, скажем, при очень малых влажностях эта формула используется и дает неправильный результат? Скажем, формула линейна по некоторой переменной, а, может, там не линейность, а что-нибудь другое, показатель 1.1 стоит, скажем, или, наоборот, 0.9. Насколько вот проверялась устойчивость результатов к виду этих формул? Ну, если взять не линейную зависимость, а немного

*возмущенную? Не было экспериментов модельных, как сильно это скажется на результатах?*

Володин Е.М.: Мой опыт показывает, что если в этих формулах немножко поменять коэффициенты, например, поставить другие типы растительности или везде поставить один тип растительности, некий средний, то результат – испарение - изменится не много. А здесь... я не знаю.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Ну, в общем, вопрос этот специально не исследовался. Спасибо. Есть вопросы еще? Тогда с вопросами мы закончили.

## **Дискуссия**

**С развернутым комментарием выступает А.В. Елисеев, (ИФА им. А.М. Обухова РАН), (развернутый комментарий прилагается отдельным файлом).**

Семенов С.М., председательствующий: Спасибо, Алексей Викторович. Есть, может, вопросы к Алексею Викторовичу какие-нибудь?

Семенов С.М. (ИГКЭ): Алексей Викторович, а какая стандартная характеристика морского льда, используемая при сравнении модели с фактами?

Елисеев А.В.: Если брать спутниковые данные, то это, конечно, площадь распространения морского льда.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Т.е. общая площадь, попросту говоря?

Елисеев А.В.: Да, общая площадь, но как бы в его внешних границах.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Контур, да?

Елисеев А.В.: Но дело в том, что, если мы берем, например, отклик на внешнее воздействие, то вообще физически более, на мой взгляд, обусловленной является такая характеристика, как объем морского льда. Объем морского льда более тесно связан с площадью морского льда, а не с площадью распространения.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Но это никто мерять не умеет толком ведь. Это надо бурить.

Елисеев А.В.: Ну бурить уже не надо. Это, в принципе, сейчас по спутникам уже хорошо “смотрится”.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Т.е. зондирование происходит?

Елисеев А.В.: Там, да, и альтиметрия используется. Потому что с помощью закона Архимеда можно даже толщину льда восстанавливать. А уж разница между открытой водой и льдом - она “оттуда” (со спутников) хорошо видна.

Семенов С.М., председательствующий: Спасибо. Есть вопросы еще к Алексею Викторовичу? Пожалуйста. Есть желающие выступить еще? Спасибо, Алексей Викторович.

Вот Михаил Дмитриевич Корзухин, по-моему, он среди присутствующих единственный человек, который занимался испарением.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Если можно, формулу с испарением (с растительности) из доклада Е.М. Володина, поднимите, пожалуйста, на экран. Михаил Дмитриевич обрабатывал данные, как я понимаю, с испарительных полигонов ГГИ. При этом использовался в качестве базовой зависимости закон Дальтона – испарение зависело от температуры и скорости ветра, и, естественно, влажности. Насколько эта формула (на экране) похожа на ту, которая основана на законе Дальтона?

Корзухин М.Д.: Насколько я понимаю, это просто полное совпадение с законом Дальтона.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Правильно я понимаю, что здесь сопротивление  $R$  такое же, как в формуле Дальтона?

Корзухин М.Д.: Да, это так, только мы использовали проводимость вместо сопротивления,  $g = 1/R$ .

Семенов С.М. (ИГКЭ): Да. И проводимость справа – такая же как у нас для закона Дальтона? Да?

Корзухин М.Д.: Не совсем, проводимость у нас зависела только от скорости ветра. То, что здесь (на экране) написано – это более сложный вариант для реального испарения с растительности. Это сугубо эмпирическая очень широко используемая формула Джарвиса, ее из физики вывести нельзя. Кроме того, желательна еще зависимость проводимости от  $CO_2$ .

Семенов С.М. (ИГКЭ): При чем здесь  $CO_2$ ?

Корзухин М.Д.:  $CO_2$  – это существенная физическая переменная для проводимости.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Верно ли, что мы оценивали испаряемость, а здесь испарение с конкретного субстрата?

Корзухин М.Д.: Да, у нас было потенциальное испарение, ИСПАРЯЕМОСТЬ, здесь же описывается реальное ИСПАРЕНИЕ.

Семенов С.М., председательствующий: Спасибо. Есть желающие что-то сказать?

Семенов С.М. (ИГКЭ): Евгений Михайлович, я хочу уточнить один важный момент. Давайте посмотрим на вертикальный нерадиационный перенос тепла. Ну вот в учебнике написано, что он зависит от вертикального градиента температуры. Если не рассматривать тонкости, то если вертикальный градиент будет менее крутой, чем адиабатический, то турбулентность не будет развиваться, а если он будет круче, то будет развиваться. А как она будет развиваться? В чем физика процесса? При сверхадиабатическом градиенте температуры, если взять какой-то шарик воздуха, переместить его мгновенно чуть повыше, он, естественно, расширится. Он будет более теплым и менее плотным, чем окружающие его «аборигены» такой же массы. Архимедова сила будет его толкать далее вверх. Постепенно он свое тепло отдаст окружающим, так сказать, «умрет». И вот такие шарики, поднимающиеся вверх, а также опускающиеся вниз, как раз и обеспечивают перенос тепла. Т.е., вообще-то вертикальный поток тепла на заданной высоте в данном случае, зависит не только от градиента температуры на данной высоте, но и от того, что происходило внизу и сверху, сколько там народилось этих шариков, которые «тащат» тепло или холод вверх или вниз. Вот Вас не смущает то обстоятельство, что употребление классической формулы, которую Вы нам показали, учитывает только локальный механизм образования потока тепла и не учитывает то, что в этом потоке есть нелокальные составляющие?

Володин Е.М.: Да, это действительно не очень хорошо, что вот та формула, она локальна, а турбулентность может быть нелокальной, и, по-хорошему, надо учитывать, ну, по крайней мере, весь вертикальный профиль.

Семенов С.М. (ИГКЭ): У Вас нет такого чувства, что вся эта теория, как описывать турбулентный перенос тепла в вертикальном направлении, она может привести к очень большим ошибкам, если употреблять локальную формулу? Что это может быть источником некоторых больших недоразумений? Что говорят специалисты на эту тему? Я знаю только одного человека, который обычно на эту тему говорит, С.С. Зилитинкевич. Он говорит, что классические формулы турбулентности, которые Монин и

*Обухов ввели в науку, к ситуации гравитации не очень приложимы. Что Вы думаете на эту тему? Есть ли необходимость как-то интенсивно думать на эту тему, пересматривать эти подходы, что ли? Потому что это такой явный недостаток.*

Володин Е.М.: Он то же говорит. Это так. Но предлагает опять свои параметризации пограничного слоя, тоже коэффициент вертикальной диффузии, только там они вычислены несколько по-другому. Видимо, все-таки, в основном, этот подход применим. И каким-то образом он ошибки, про которые Вы говорили, компенсирует. Но иногда...он просто неприменим,...иногда. Потому что в основном, либо все-таки мы имеем пограничный слой, который полностью перемешан и в нем все происходит однородным образом, а если – нет, то тогда, значит неприменим, но такое...тоже происходит.

Семенов С.М. (ИГКЭ): *Так же часто говорят о том, что вот эти традиционные пути переноса энергии, с помощью конвекции, турбулентной диффузии и т.д., что они совсем не самые эффективные, что есть некоторые вертикальные вихревые движения, которые гораздо более мощные в смысле переноса энергии. Это вот мода такая, или, действительно, есть какие-то основания так думать?*

Володин Е.М.: Кроме вот такой классической турбулентности есть еще влажная конвекция. Если условия для нее хорошие, то она более эффективна. Ее параметризации уж точно не локальные.

Семенов С.М. (ИГКЭ): *Хочу заметить, что если мы вспомним энергетический бюджет климатической системы Земли, то от земной поверхности в атмосферу радиационным путем уходит в среднем  $390 \text{ Вт/м}^2$ , как известно. А суммарно при помощи термик и эвапотранспирации, уходит около сотни. Т.е. эти нерадиационные потоки, они глобально составляют примерно 25% от радиационного потока, что не мало, вообще говоря, но составляет, все-таки, только часть. Насколько я понимаю, в некоторых случаях, в некоторых широтах, превалируют одни механизмы, в других местах – другие механизмы.*

*И последний вопрос, который я хотел бы Вам задать. Скажите, пожалуйста, насколько существенный поток тепла, выделяемый в Антарктиде и Арктике при кристаллизации льда из снега? Когда снег слеживается и получается лед, выделяется тепло. Насколько этот поток существенен, насколько он отапливает Арктику и Антарктику? Как Вы считаете? Может быть, это не к сегодняшнему разговору.*

Володин Е.М.: Я даже не знаю. А сколько тепла..., какова теплоемкость этого процесса?



Семенов С.М. (ИГКЭ): Я этого сейчас не припомню. Просто, очень интересно, либо это мелочь какая-то, либо это процесс, отапливающий полярные шапки.

Володин Е.М.: В нашей климатической модели это не учитывается. Считается, что снег просто переходит в лед.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Вообще говоря, при этом выделяется тепло, при этом процессе. Т.е. сначала тепло выделяется где-то там, когда образуются снежинки; они падают на Землю, и когда из этого получается лед, опять выделяется тепло. Сколько? У меня сейчас нет оценок.

Володин Е.М.: И даже, я вот слушал доклады о моделях ледникового щита, ледниковых щитов континентальных; тоже там нет этого слагаемого.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Я думаю, что в следующий раз...

Володин Е.М.: Если просто предъявите коэффициент этого ледообразования, в джоулях на килограмм, то тогда...

Семенов С.М. (ИГКЭ): Пожалуй, что предъявлю. А Вы знаете мощность процесса? Да?

Володин Е.М.: Ну да.

Семенов С.М. (ИГКЭ): Сколько образуется? Можно умножить, и посмотреть...  
Спасибо большое.

Семенов С.М., председательствующий: Есть желающие еще что-то сказать?  
Да, Михаил Дмитриевич, пожалуйста.

Корзухин М.Д.: Евгений Михайлович, испарение с растительности зависит от количества листовой, а листового индекса у Вас в явном виде нет. Он что, где-то скрыт в параметрах?

Володин Е.М.: Считается, что каждому типу растительности приписан максимальный листовой индекс, он может меняться в зависимости от реальных условий.

Корзухин М.Д.: Понятно. Спасибо.

**Семенов С.М., председательствующий:** *Есть желающие еще что-нибудь сказать? Тогда давайте поблагодарим Евгения Михайловича за очень интересный доклад. И Алексея Викторовича за комментарий. Спасибо. На сегодня мы закончили. Благодарю Вас.*