

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

25 октября 2017 года

SUMMARY

(составлено к.б.н. И.О. Поповым, ИГКЭ)

Состоялся доклад **д.ф.-м.н. ЕЛИСЕЕВА Алексея Викторовича** «Глобальный цикл метана» (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, ИФА им. А.М. Обухова РАН, Казанский (Приволжский) федеральный университет). С развернутым комментарием выступил **к.ф.-м.н. СТЕПАНЕНКО Виктор Михайлович** (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет). Председательствовал **д.ф.-м.н. Семенов Сергей Михайлович** (ИГКЭ, Институт географии РАН).

Семенов С. М. (председательствующий): Добрый день, уважаемые коллеги! Сегодня у нас день посвящен метану. У нас будет докладчик Алексей Викторович Елисеев, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Комментатором будет Виктор Михайлович Степаненко, Географический факультет и Вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова.

Мы немножко изменим формат. Я скажу несколько слов в качестве введения. То, что вы видите сейчас на экране, это как раз Введение.

Все вы знаете, что метан — сильный парниковый газ, по крайней мере на порядок сильнее, чем углекислый газ. Правда, содержание его в атмосфере существенно меньше, чем у углекислого газа. Эмиссии его в атмосферу — естественные и антропогенные — также существенно меньше.

У метана есть не только естественные, но и антропогенные источники эмиссии, причем если посмотреть на эти цифры на 2-м слайде (эти цифры довольно старые, но масштаб потоков сохраняется и сейчас), то видно, что антропогенные источники в сумме дают больше, чем естественные источники. Т.е. естественный поток сильно нарушен вследствие антропогенной добавки.

Вот данные (3-й слайд) из последнего доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Самая нижняя полоса (желтый цвет) — эмиссия углекислого газа от сжигания ископаемого топлива и производство цемента. Следующая (красный цвет) — эмиссия CO₂ от лесного хозяйства и изменения землепользования. Дальше (синим цветом) — метан. Как видите, эмиссии метана не очень возрастают по абсолютной величине, а в процентах — 19%, 17%, 16% — доля его даже немного падает. Причина — рост доли CO₂. Ну, дальше там — закись азота и фторированные газы, не будем сейчас о них говорить.

Эмиссии всех газов приведены здесь в CO_2 -эквиваленте, т.е. эмиссии всех газов даются в таких величинах, чтобы единица была эквивалентна одной единице CO_2 в смысле влияния на климат.

Эта карта (слайд 4) довольно загадочна для меня. Это выброс метана наземными экосистемами. Тут свалены в кучу и естественные экосистемы, и антропогенные экосистемы. В Западной Сибири, вы видите, есть желтоватое пятно, это эмиссия метана из болот. Это сильное красноватое пятно в Индии и странах Индокитая — рисоводство, поскольку это один из основных источников метана. Замечу, что эта карта — синтез результатов прямых измерений, обработки дистанционных (спутниковых) данных и моделирования.

Это (слайд 5) профиль метана в атмосфере. Здесь довольно чудная шкала по оси абсцисс — это десятки метров. Вы можете видеть, что до десяти тысяч метров концентрация метана примерно постоянная, если измерять в объемном отношении компонентов смеси (volume mixing ratio), т.е. в частях на миллион (ppm), например. Мы попросим докладчика пояснить, почему так происходит.

Вот наши «успехи» (слайд 6). Это обогащение атмосферы метаном с 1750 года примерно по 2011 год. Как видите, рост довольно большой: от 0.7 ppm до почти 1.8 ppm.

Вот палеоданные (слайд 7), последние, которые есть. Это керн со станции «Восток», Антарктида, за 800 тыс. лет назад. Слева — палеозапись, которая восстановлена по ледовому керну со станции «Восток». Тогда метана было примерно 0,5 частей на миллион, а справа — последние пятьдесят лет. Как видите, произошло резкое возрастание до 1,75 ppm. На картинке, правда, концентрации даны в частях на миллиард, в ppb.

То, что вы видели сейчас, это рост глобальной концентрации. А как все это устроено в пространстве? Это (слайд 8) — сеть пунктов измерений Научной и промышленной исследовательской организации Содружества наций (CSIRO), Австралия. Обработывались данные инструментальных измерений в этих пунктах, которые расположены совсем в разных условиях: в Антарктиде, на западном побережье США (в Орегоне), в Австралии, в Канаде, на севере Европы. Мы нанесли эти данные измерений на один график (слайд 9). Вот что получилось. Слева символы этих пространственных точек. Как видите, абсолютные значения концентраций немного различаются, но ход во времени один и тот же. С какой-то степенью грубости можно сказать, что тренд одинаковый, хотя исходные базовые уровни разные. Т.е., в первом приближении, концентрация метана меняется во времени везде сходным образом, но абсолютные значения в разных точках отличаются на константу.

Это (слайд 10) глобальная среднемесячная и среднегодовая концентрации метана. Как видите, с 2000 года по 2007 год наблюдалось «плато», метан глобально не рос. Мы тоже попросим Алексея Викторовича это объяснить в докладе, почему была такая пауза, а также почему в 2007 года опять возобновился рост концентрации метана. Конечно, причин там много, но какие есть гипотезы о ведущих драйверах?

Если посмотреть более внимательно на месячные колебания (слайд 11), мы увидим, что в течение года концентрация метана меняется и довольно заметно. Хотя сказать, что зимой всегда больше, чем летом, нельзя. И что летом больше, чем зимой, тоже нельзя. Концентрация меняется довольно нерегулярно. Хорошо бы понять, почему это происходит.

Вот мы показали некоторое количество картинок и попросим Алексея Викторовича попытаться ответить на некоторые вопросы (слайд 12), возникшие при их рассмотрении. Я на этом закончу и предоставлю слово Алексею Викторовичу, пожалуйста.

(ЕЛИСЕЕВ А.В. ВЫСТУПАЕТ С ДОКЛАДОМ, ТЕКСТ ДОКЛАДА И ПРЕЗЕНТАЦИЯ ПРИЛАГАЮТСЯ).

Семенов С.М. (председательствующий): Большое спасибо, Алексей Викторович. Какие будут вопросы, коллеги?

ВОПРОСЫ/ОТВЕТЫ/ДИСКУССИЯ

Гречушникова М.Г. (кафедра гидрологии суши, географический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова):

У меня вопрос по поводу стоков метана. Вы говорили о том, что 90% потерь — это реакция в атмосфере с радикалом ОН. Скажите, пожалуйста, в воде эта закономерность аналогична или нет?

Елисеев А.В.: Водой метан из атмосферы почти не поглощается, там эта реакция не идет, она идет только в воздухе.

Гречушникова М.Г. (кафедра гидрологии суши, географический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова):

Т.е., в воде почти исключительно за счет окисления молекулярным кислородом?

Елисеев А.В.: В воде все окисление метана идет только в пузырьках.

Криволуцкий А.А. (Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета): Правильно я понял, что увеличение содержания метана в атмосфере приводит к увеличению концентрации озона?

Елисеев А.В.: Да.

Криволуцкий А.А. (Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета): Это как-то подтверждено наблюдениями?

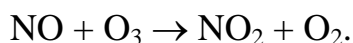
Елисеев А.В.: Конечно. Надо сказать, что рост концентрации озона обусловлен, конечно, не только метаном. Но эффект метана достаточно хорошо виден при

измерении и в лабораторных экспериментах. Все эти элементарные химические реакции установлены достаточно надежно.

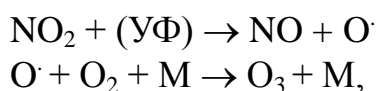
Криволицкий А.А. (Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета): Я немного другое спрашиваю. Вклад метана в разрушение тропосферного озона можно оценить?

Елисеев А.В.: Я не являюсь специалистом по озоновому циклу и поэтому не готов отвечать на данный вопрос.

Семенов С.М. (председательствующий): Алексей Александрович, как известно, имеющиеся в атмосфере оксид и диоксид азота могут трансформироваться друг в друга. Озон играет при этом важную роль. Он непосредственно участвует в окислении оксида азота в ходе реакции второго порядка:

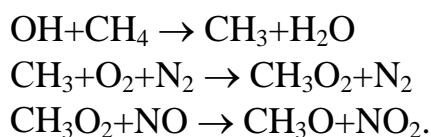


Существует и противоположный процесс - восстановление NO из NO₂ в ходе фотохимической реакции. Оно сопровождается образованием озона:



где O[·] - возбужденный атом кислорода, а M - третье тело, поглощающее энергию возбуждения.

В совершенно идеализированной ситуации, когда сумма NO_x постоянна (т.е. их эмиссия и выведение отсутствуют), в упомянутом выше цикле избыточный озон не продуцируется. Здесь обогащение атмосферы озоном может произойти только в случае его более интенсивного образования по сравнению с разрушением. Это может возникнуть при наличии еще одного или нескольких процессов трансформации NO в NO₂, в которые не вовлечен озон. Это может происходить и с участием метана:



Таким образом, теоретически вклад метана в образовании избыточного озона есть. Однако считается, что небольшой.

Романовская А.А. (ИГКЭ): Спасибо за очень интересный доклад. Вы говорили про глобальный потенциал потепления, но не пояснили про температурный

потенциал. Не могли бы Вы его характеризовать, объяснить почему он неудачный, как Вы сказали.

Елисеев А.В.: Как раз температурный потенциал более удачный. Дело в том, что потенциал изменения глобальной температуры (Global Temperature change Potential - GTP) характеризует глобальный отклик за счет данной парниковой составляющей относительно изменения эффекта CO₂. Правда, непонятно, как меняется во времени отклик на CO₂, но это отдельный вопрос. Эта величина хотя бы физически интерпретируема - это вклад в текущее потепление данной парниковой составляющей, если за единичное принято воздействие CO₂. Потенциал глобального потепления (Global Warming Potential – GWP), выраженный в виде интеграла радиационного форсинга, физически не интерпретируем. Ведь интеграл берется по всему времени, условно - от начала индустриального периода (1750 г.) или какого-то другого момента, в то время как в случае температурного отклика интегрирование производится по последнему периоду, за несколько десятков лет, при разных параметрах системы.

Романовская А.А. (ИГКЭ): *Т.е. температурный потенциал проще?*

Елисеев А.В.: Температурный по крайней мере интерпретируем. GWP, несмотря на то, что часто используется, прикладного смысла никакого не имеет.

Нахутин А.И. (ИГКЭ): *Вы упомянули про причины последнего температурного оптимума, они связаны с увеличением метана. А в чем была причина увеличения метана, какие предположения?*

Елисеев А.В.: Считается, что первоначально была температурная аномалия, которая вызвала - по термодинамическим причинам - диссоциацию метана, который выделился в атмосферу, вызвал парниковое воздействие и усилил первоначальную аномалию. Тут все части этой цепочки являются непонятными. Если происхождение метановой части косвенно подтверждается измерением изотопного состава, то происхождение начальной температурной аномалии является огромной загадкой.

Попов И.О. (ИГКЭ): *Имеется ли какое-то значение мировой океан как сток метана?*

Елисеев А.В.: Очень слабое, потому что растворимость метана в воде очень низка.

Куричева О. А. (Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН): *В температурном оптимуме голоцена содержание метана было немного ниже, чем в 1700-х годах. Почему?*

Елисеев А.В.: Считается, что поскольку в целом на протяжении голоцена углерод накапливался в торфяниках, то в течение голоцена несколько увеличивалась интенсивность выделения из них метана. Просто было больше углеродного субстрата. Плюс климат, как считается, стал более влажным, что способствовало тому, что в тех регионах, где находятся основные торфяники, больше возникло анаэробных условий. Эти два эффекта, трудно сказать, в каком соотношении, привели к тому, что с середины голоцена до начала индустриального периода эмиссия и концентрации в атмосфере чуть-чуть выросли.

Инсаров Г.Э. (ИГКЭ): В самом начале Вы перечисляли источники эмиссии (болота и др.). Есть такие антропогенные источники как сельскохозяйственные резервуары и водохранилища, связанные с энергетикой. Учитывался ли их вклад и если учитывался, к какой категории они были отнесены?

Елисеев А.В.: Учитывались. Общий вклад — около 10%. Так что если бы даже не учитывались, к большой ошибке это бы не привело.

Семенов С.М. (председательствующий): Потепление в тропосфере должно интенсифицировать источники метана и его стоки (химические реакции, идущие в тропосфере). Как эти факторы будут взаимодействовать? В результате потепления будет повышаться концентрация метана или нет? Или до некой температуры будет идти рост, а после нее снижение?

Елисеев А.В.: Общий баланс совершенно непонятен. Мы проводили исследования. В модели брали зависимость эмиссии из болот от климата и зависимость от климата времени жизни метана, т. е. по сути интенсивность стока в зависимости от температуры. Получалось, что изменение времени жизни способно скомпенсировать рост эмиссии полностью или даже больше. Но дело в том, что эта обратная связь слабая и этот широкий интервал связан с тем, что их никто толком не измеряет, потому что все равно получатся слабые оценки.

Семенов С.М. (председательствующий): Насколько я знаю, насколько пишут, при потеплении источники активизируются, метана образуется больше. Нет ли такой ситуации, что какие-то из источников подавляются, например, за счет засухи?

Елисеев А.В.: В принципе, да, это может быть.

Семенов С.М. (председательствующий): Т.е., это известно точно. А вот что неизвестно — это про эти реакции стока?

Елисеев А.В.: Там проблема даже не в самой температурной зависимости скорости реакции. Температурные константы реакций хорошо известны. Главная проблема в том, сколько будет гидроксил-радикалов при потеплении. А поскольку он образуется за счет фотодиссоциации молекул воды, то все приводит к вопросу, сколько воды будет в атмосфере. Этот вопрос более темный, поскольку тут начинают сказываться циркуляционные особенности и прочие вещи.

Семенов С.М. (председательствующий): Большое спасибо за Ваши ответы, Алексей Викторович. Давайте теперь послушаем комментарий Виктора Михайловича Степаненко.

К.ф.-м.н. СТЕПАНЕНКО Виктор Михайлович (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет) выступает с комментариями (презентация и текст прилагаются).

Семенов С.М. (председательствующий): Большое спасибо, Виктор Михайлович.

Коллеги! Сегодня был исключительно насыщенный информацией доклад и комментарий. Когда речь идет о соотношениях между уровнями эмиссии и содержания в атмосфере, то с метаном все, казалось бы, понятно. Все знают, как сложны модели циклов CO_2 , а с метаном все просто. Он рождается на земной поверхности, поднимается вверх в атмосфере и умирает, в основном, в реакции с гидроксидом. Мы можем написать, что изменение за год содержания метана в атмосфере равно годовому потоку с земной поверхности минус $1/12$ его содержания в атмосфере (12 лет – время жизни). При помощи этого нехитрого уравнения мы будем легко пересчитывать эмиссии в содержание, а из содержания находить концентрации, поскольку он равномерно распределен в тропосфере и даже чуть выше.

Но простота казалась несколько иллюзорной, как показал сегодняшний доклад. Есть разные зависимости скорости этих реакций от температуры. И объяснить с помощью этого простого подхода плато, которое наблюдается в 2000-2007 годах, не получается. Получается много разговоров, но не получается окончательного решения этого вопроса.

Теперь с историческим прошлым. Мне кажется, что Алексей Викторович здесь немного усложнил. Все-таки есть одна гипотеза, которая однозначно объясняет, почему наблюдаются такие колебания концентрации метана в последние 800 тысяч лет. Можно вспомнить работу В.М. Котлякова с соавторами. Там так были подобраны шкалы, что временной ход температуры,

концентраций метана и CO_2 почти совмещались. Это говорит о том, что исходным драйвером изменения и концентрации метана, и концентрации CO_2 была температура. Осталось только объяснить, почему менялась температура. Это в начале прошлого века объяснил Милутин Миланкович. Температура менялась, потому что циклически изменялись параметры орбиты Земли. Поток солнечной энергии, который достигал поверхности Земли, был то немного меньше, то немного больше среднего значения. Это приводило к тому, что на Земле становилось немного теплее или немного холоднее, а это приводило к изменению эмиссии и концентрации CO_2 и метана. В случае CO_2 это приводило, прежде всего, к смещению равновесия между океаном и атмосферой в пользу атмосферы, а в случае метана это приводило просто к тому, что источники метана активизировались. Это вот такое простое объяснение, можно его критиковать.

Теперь относительно двух прикладных аспектов. Мы поняли, что мониторинг концентрации метана в атмосфере желательно проводить на нескольких станциях в разных широтах, поскольку есть явная широтная зависимость, если мы хотим знать тонкости. А если не хотим знать тонкостей, то можно воспользоваться широтной поправкой, измеряя концентрацию в одном месте. Поэтому нет необходимости в густой измерительной сети для мониторинга глобальной концентрации метана.

Совершенно другая ситуация с эмиссиями метана. Эмиссии очень неоднородны, изменчивы в пространстве, и если хотим оценивать эмиссии, надо учитывать в пространстве «подробно». Учитывать подробно при помощи сети станций невозможно, немыслимо дорого. Надо в перспективе привлекать дистанционные методы. Сейчас полагаться на спутниковые данные полностью нельзя, ошибка очень велика; надо обязательно калибровать дистанционно измеряемые эмиссии по результатам наземных инструментальных измерений, а потом менять коэффициенты пересчета, как это сейчас и делается.

И последнее замечание — относительно глобальных потенциалов потепления и температуры. Откуда возникла эта проблема? Парниковые газы разные. И когда есть выбросы разных парниковых газов, нужно их эффекты на глобальную температуру как-то сложить. Непосредственно просуммировать потоки эмиссий (в ед. массы в ед. времени) нельзя, они имеют разное влияние на климат, разные последствия для потепления. Поэтому сначала придумали глобальный потенциал потепления — коэффициенты отражающие влияние на климат через радиационное воздействие. Посмотрели влияние тонны выброса CO_2 и тонны выброса метана на суммарный нисходящий поток радиации в тропосфере, сравнили их и получили коэффициент для метана, приняв эффект CO_2 за единицу. Теперь эмиссию метана, умноженную на этот коэффициент, можно просто складывать с эмиссией CO_2 .

Тут есть проблема: этот коэффициент зависит от временного горизонта. Если временной горизонт, скажем, 20 лет, будет одно значение, если другой — другое значение. Насколько мне известно, стандарт — 100 лет.

Но дальше прикладные исследователи задались вопросом: зачем смотреть на какой-то радиационный поток на уровне тропопаузы? Мы же не живем там. Давайте смотреть на что-то другое и понятное, например, на температуру в приповерхностном слое, где мы живем. Так возникла другая система коэффициентов – потенциалы изменения глобальной температуры (GTP). Их применение такое же, как у GWP – суммировать выбросы разных парниковых газов.

Думаю, такие метрики буду дальше множиться и совершенствоваться и сказать, какая из них в научном отношении лучше или хуже, трудно. Но то, что пока понятнее, это температурный потенциал.

Предлагаю на этом завершить наш семинар. Благодарим еще раз Алексея Викторовича и Виктора Михайловича за содержательные доклад и комментарии.