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

11 ноября 2016 года

SUMMARY

(составлено А. А. Рудковой, Институт географии РАН)

Состоялся доклад **к.филос.н. Мурышева Кирилла Евгеньевича** (Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН) «**Возможные механизмы запаздывания между изменениями глобальной температуры и содержания углекислого газа в атмосфере**». С развернутым комментарием выступил **д.г.н. Кислов Александр Викторович** (Географический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова). Председательствовал д.ф.-м.н. **Семенов Сергей Михайлович**, ИГКЭ, Институт географии РАН.

Семенов С. М. (председательствующий): Добрый день, уважаемые коллеги. Мы сегодня проводим семинар после некоторого перерыва. Прежде чем предоставить слово докладчику Кириллу Евгеньевичу Мурышеву, я попрошу Алексея Волкова поставить несколько моих слайдов для введения. После этих вводных слов будет выступление Кирилла Евгеньевича, а потом Александр Викторович Кислов прокомментирует этот доклад. У нас сегодня всё происходит на «повышенном» технологическом уровне, а именно: на связи по скайпу Петербург, где к заседанию присоединился Олег Александрович Анисимов. Мне кажется, что и Анна Анатольевна Романовская пытается до нас дозвониться из Марракеша, Марокко, где происходит сейчас 22-я Конференция сторон Рамочной Конвенции ООН об изменении климата. Ну, будем надеяться, что связь будет.

Не лишнее еще раз напомнить, что такое ‘климат’. Это средние параметры погоды за длительный период времени. Подчеркну, что это не только многолетние средние значения гидрометеорологических величин, но и статистические характеристики их наблюдаемых отклонений от многолетних средних. Климат формируется в ходе взаимодействия разных элементов климатической системы. Она состоит из криосферы, гидросферы, атмосферы, биосферы и педосферы (почвогрунты). Между ними есть взаимодействия - потоки массы и энергии. Земля по массе практически замкнута. Но по энергии – открытая система. Основной источник энергии – Солнце. Посмотрим на следующий рисунок.

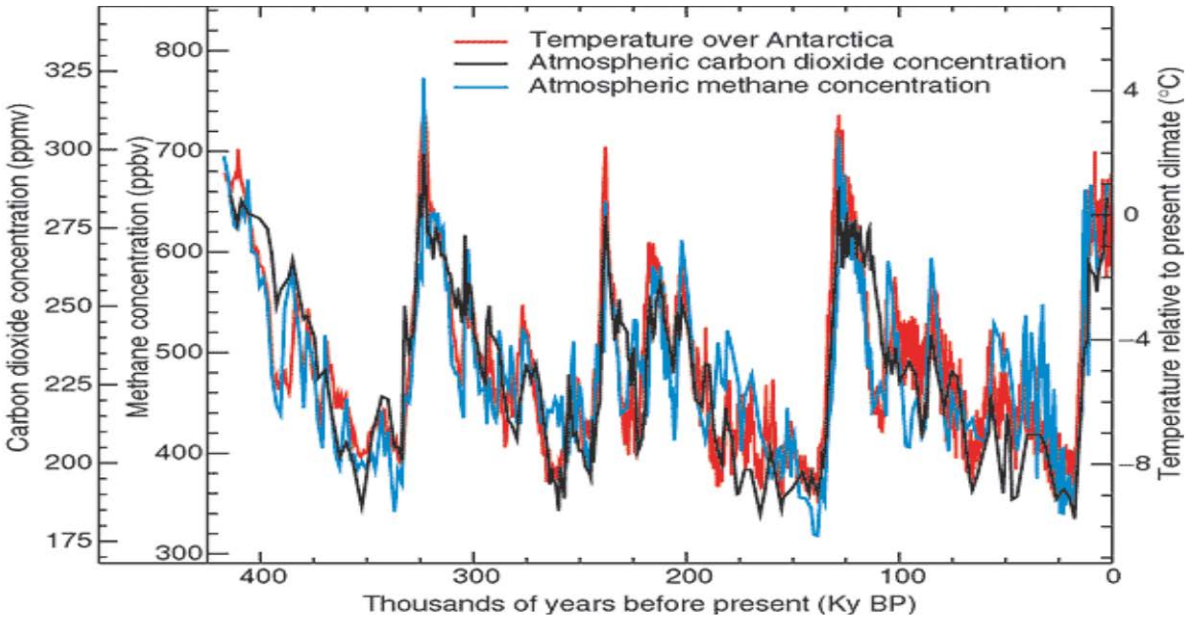
Здесь представлены потоки энергии (Вт м$^{-2}$) в системе «атмосфера + земная поверхность» (Trenberth K. E., Fasullo J. T., Kiehl J. 2009. Earth’s global energy budget. Bulletin of American Meteorological Society, p. 311-323).

Это современная схема энергетического баланса Земли. От Солнца приходит на верхнюю границу атмосферы в среднем 341.3 Вт/м^2 энергии в виде излучения, в основном в видимом диапазоне спектра. Часть отражается атмосферой в космос, остальное проникает в атмосферу, претерпевая рассеяние и поглощение, вплоть до земной поверхности. Земная поверхность и атмосферные слои излучают энергию в инфракрасном диапазоне. Атмосфера, весьма прозрачная для коротковолнового излучения, плохо пропускает инфракрасное излучение. Оно многократно поглощается в атмосфере и излучается вновь, пока не уйдет в космос. При этом в равновесии его уходит в космос столько же, сколько поглощается коротковолнового, солнечного излучения системой ‘атмосфера+земная поверхность’.

Когда говорится, что на верхнюю границу атмосферы приходит в среднем 341.3 Вт/м^2 энергии в виде коротковолнового излучения Солнца, не надо считать, что это строгая постоянная. Этот поток меняется во времени. Например, существует одиннадцатилетний цикл Швабе. Эти колебания, совсем небольшие – примерно на 0.1% от среднего значения.

Но есть колебания и со значительными периодами – десятки и сотни тысяч лет. Когда Земля вращается по своей орбите вокруг Солнца, то, во-первых, периодически меняется эксцентриситет этой орбиты, а во-вторых, земной оси свойственны два вида движений - прецессия и нутация (как у

волчка, когда скорость движения невысока). И это отражается тоже в колебаниях той суммы энергии, которую поглощает земная поверхность. Земля то в большей степени начинает «смотреть» на Солнце низкими широтами, где солнечное излучение хорошо поглощается земной поверхностью, то в большей степени высокими широтами, где много льда, обладающего высокой способностью отражать солнечное излучение. Из-за этого температура земной поверхности переменная. Вот, все мы знаем эту картинку.



На ней приведены изменения температуры и атмосферных концентраций метана и диоксида углерода, полученные по результатам анализа антарктических ледовых кернов, станция «Восток» в Антарктиде (Jouzel, J., C. Waelbroeck, B. Malaize, M. Bender, J.R. Petit, M. Stievenard, N.I. Barkov, J.M. Barnola, T. King, V.M. Kotlyakov, V. Lipenkov, C. Lorius, D. Raynaud, C. Ritz, and T. Sowers. Climatic interpretation of the recently extended Vostok ice records. *Climate Dynamics,* 1996, 12:513-521). Её, я думаю, покажет сегодня ещё не раз докладчик. Это результат анализа антарктического керна на станции «Восток». Как видите, температура демонстрирует циклические колебания с довольно большой амплитудой, более 10°С. Это есть отражение колебаний орбитальных параметров Земли, о которых мы говорили выше.

Заметим, что здесь на одной картинке путём манипуляции линейными масштабами шкал показана и температура (она показана красным цветом, правая шкала) и концентрации диоксида углерода CO_2 и метана CH_4 (левая шкала). Как видите, эти колебания очень похожи. Т. е. возникает мысль, что одни колебания управляют другими колебаниями. Вот сегодняшний доклад о том, ***кто кем управляет и можно ли это понять, исходя из данных наблюдений***.

Есть люди, которые считают, что ведущий здесь эффект – парниковый. Т.е. концентрации CO_2 и CH_4 испытывают колебания по каким-то причинам, и из-за этого на Земле становится то теплее, то холоднее – парниковый эффект то усиливается, то ослабевает.

Есть другие люди, которые говорят, что здесь этот эффект не имеет большого значения. Ведущим же фактором является температура. Она циклически меняется из-за изменений орбитальных параметров Земли (см. выше). Поэтому равновесие между атмосферой и океаном по CO_2 сдвигается то в пользу атмосферы (при потеплении), то в пользу океана (при похолодании). С метаном механизм другой, но он определенно образуется более интенсивно на земной поверхности при потеплении.

Некоторые исследователи пытаются изучать такие рисунки, как последний, для выяснения следующего вопроса: пиковые значения каких переменных наблюдаются раньше пиковых значений других? То, что раньше наблюдается – причина, то, что позже – следствие. Сегодняшний докладчик нам расскажет, в частности, о том, корректны ли такие заключения. Пожалуйста, Кирилл Евгеньевич.

(К. Е. МУРЫШЕВ ВЫСТУПАЕТ С ДОКЛАДОМ, ТЕКСТ ДОКЛАДА И РИСУНКИ ПРИЛАГАЮТСЯ).

ВОПРОСЫ К К.Е. МУРЫШЕВУ/ОТВЕТЫ/ДИСКУССИЯ

Кислов А. В. (Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова): Вопросов по докладу получилось два. Первый вопрос такой: если вернуться к концептуальным уравнениям, то почему бы не учесть ещё влияние изменения температуры на свойства иные океана, например, на растворимость CO_2? Как изменится при этом всё, о чем Вы говорите?

Мурышев К. Е.: Сейчас я вернусь к этой системе уравнений. Дело в том, что у нас влияние температуры на растворимость CO_2 учитывалось. Кроме того, от температуры зависит парциальное давление углекислого газа в морской воде. Парциальное давление пропорционально содержанию углерода в морской воде, а коэффициент пропорциональности зависит от текущего содержания CO_2 в атмосфере и от температуры. Это так называемый буферный фактор.

Кислов А. В. (Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова): Хорошо. И второй вопрос к этому же слайду, более общий: вот вы много раз упоминали «РВВ» - радиационное возмущающее воздействие. Складывается впечатление, что это внешний фактор, не связанный с концентрациями парниковых газов в атмосфере. Это так?

Мурышев К. Е.: Радиационный форсинг – фактор изменения температуры на Земле. Изменение потоков излучения в климатической системе Земли приводит к изменению температурного режима.

Кислов А. В. (Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова): Всё равно, до конца не ясно. Радиационное воздействие есть внешний фактор, связанный с изменением потока солнечной энергии, достигающего верхней границы атмосферы, или оно как-то связано с содержанием парниковых газов в атмосфере и, тем самым, с изменением ее парниковых свойств?

Семенов С. М. (ИГКЭ): По определению РВВ - радиационное возмущающее воздействие – есть изменение нисходящего нетто-потока излучения на уровне тропопаузы. При этом не важно, по каким причинам – из-за изменения потока солнечной энергии, приходящего на верхнюю границу атмосферы, или из-за изменения парниковых (или иных радиационных) свойств самой атмосферы, например, свойств отражения коротковолнового излучения или поглощения длинноволнового излучения. Правильно?

Мурышев К. Е.: Да, совершенно верно.

Егоров В. И. (ИГКЭ): Как определяются аномалия CO_2 и аномалия температуры? Ну, про температуру более или менее понятно: разность наблюдаемой и нормы за какой-то период времени. Но, что касается CO_2, какую норму Вы берёте для определения аномалии? Среднюю концентрацию за какой период?

Мурышев К. Е.: Это для нас просто технический термин. Мы записываем систему уравнений таким образом, что в нее входят не текущие значения температуры и содержания CO_2, а их отклонения от равновесного значения. В случае температуры это 13,7 градусов Цельсия, для CO_2 – это 280 ppm.

Семенов С. М. (ИГКЭ): В какой точке равновесия Вы линеаризуете Вашу систему уравнений?

Мурышев К. Е.: Когда мы ставили эксперименты с импульсным внешним воздействием, то за нулевое положение системы принималось состояние естественного равновесия. Ну, например, содержание CO_2 было 280 ppm. Пока внешнее воздействие было равно нулю, то и аномалии T, и аномалии концентрации CO_2 были равны нулю. Когда возникает внешнее воздействие, состояние системы начинает отклоняться от нулевого, естественного.

<u>Семенов С. М.</u> (ИГКЭ): У вас очень как-то педалируется в этой модели обмен углеродом с наземными системами. Мы помним, что в атмосфере в конце XX века содержалось CO_2 примерно 760 Гт (С), т.е. в углероде. В наземных экосистемах (и в вершках, и в корешках, и просто в почве) содержалось 2500 Гт (С), а в океане – 38000 Гт (С), т. е. гораздо больше. Причем ежегодный обмен атмосфера-океан очень интенсивный: поглощение из атмосферы в океан было 90 Гт (С), а эмиссия – 88 Гт (С). Когда в Специальном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) в 2000 г. оценили обмен с наземными системами в целом, глобально, то получили цифру, какую-то очень странную: 0.7 З ± 1 Гт (С). Считалось, что, в общем, это практически ноль. С чем связана такая большая роль обмена с наземными системами в Вашей модели? Просто с техническими обстоятельствами, что обмен с океаном как-то не очень хорошо прописан в модели Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН)? Или Вы действительно обнаружили какие-то свойства обмена CO_2 атмосферы с наземными экосистемами, которые говорят о том, что это вещь важная, более важная, чем с океаном?

Мурашев К. Е.: Можно сказать, что мы взяли достаточно стандартные модельные уравнения. Вопрос о том, как устроена модель ИФА РАН, лучше адресовать её авторам, А.В. Елисеев один из соавторов, он сможет лучше ответить на этот вопрос.

<u>Семенов С. М.</u> (ИГКЭ): Мой вопрос не о том, как устроена Ваша модель обмена CO_2 атмосферы с наземными системами. Я спросил, почему в Ваших рассмотрениях придается такое большое значение именно этой части, а не обмену атмосферы с океаном. Пока ясно одно, что весь эффект, о котором Вы докладывали, возникает именно из-за обмена атмосферы с наземными системами. Это всё очень хорошо, но насколько это имеет отношение к реальности? Для меня реальность, может быть я и неправ, устроена так, что обмен с океаном имеет большее значение.

Теперь скажите, пожалуйста, ещё одну вещь. Пусть в запаянной стеклянной емкости есть некоторое количество воды и воздуха, причем CO_2 в воздухе и продукты его растворения в воде находятся в равновесии. Если мы подогреем всю емкость, то равновесие сдвинется в пользу воздушной фракции CO_2, а если охладим, то в пользу раствора. Здесь все ясно, причина изменений – внешняя, изменение температуры емкости по внешним причинам.

А в реальности, в климатической системе Земли? Когда за счет приходящего на верхнюю границу атмосферы потока солнечной энергии в атмосфере становится больше CO_2 за счет выделения из океана, это, в свою очередь, дает приращение парникового эффекта, что приводит к дальнейшему увеличению температуры. Что же здесь причина, а что

следствие? Ваш доклад посвящен причинности в сложной системе с обратными связями. Это именно такой случай.

Вы приводили всякие признаки причин и следствий, например, запаздывание максимума: у какого фактора наступает пиковое значение раньше – причина, у которого позже – следствие. Можно ли этим критерием пользоваться в системах с сильной обратной связью?

Мурышев К. Е.: Понятно, что в данном случае и температура, и CO_2 являются причинами изменения друг друга. Но, если говорить о естественных изменениях, то первопричиной является изменение температуры.

Небольшое уточнение по поводу запаздывания между моментами, когда достигаются пиковые значения соответствующих переменных: основной пафос доклада как раз состоит в том, что если пиковое значение переменной T достигается позже, чем пиковое значение переменной qCO_2, то это не значит, что изменения T не могут быть первопричиной изменений qCO_2. Иными словами, следствие может опережать по фазе свою причину.

Теперь о роли океана и наземных экосистем в общем балансе углерода. Да, для конца 20 века поглощение из атмосферы в океан было 90 Гт (С) в год, а эмиссия – 88 Гт (С) в год. Теперь если мы вычтем одно из другого, то получим 2 Гт (С) в год – это глобальное значение, которое имеет тот же порядок величины, что и обмен с наземными экосистемами. В свою очередь поток углерода из наземных экосистем в атмосферу это дыхание растительности плюс дыхание почвы минус фотосинтез. Суммарное для Земли значение фотосинтеза — порядка 100 Гт (С) в год, другие два слагаемых его примерно балансируют, но не совсем точно. «Разбаланс» в один процент дает единицы Гт (С). Так что я бы не сказал, что обмен с наземными экосистемами менее важен, чем с океаном. Тем более, что зависимость этого потока от глобальной температуры более сильная, чем для потока атмосфера-океан.

Кроме того, я не уверен, что можно делать однозначные выводы о значимости или незначимости различных компонентов климатической системы на основании данных для конца 20 века. Конец 20 века - ситуация, когда в результате внешнего антропогенного воздействия в атмосфере уже содержится избыточное значение CO_2, который начинает поглощаться океаном. В ситуации, когда внешних эмиссий CO_2 в атмосферу нет (а в эксперименте, где получено «запаздывание причины относительно следствия» имелась в виду именно такая ситуация), соотношение между потоками углерода из атмосферы в океан и из наземных экосистем в атмосферу может быть отличным от того, что характерно для конца 20 века.

Наконец, можно показать, что малый по величине поток, небольшая прибавка к парниковому эффекту, способна сдвигать переменную по фазе, превращая запаздывание в опережение. Так, например, получается при учете

влияния метана на антропогенный парниковый эффект: основное потепление идет за счет CO_2, но метан сдвигает температуру по фазе, так что она достигает максимума раньше, чем аномалия CO_2, которая является главной причиной потепления.

Громов С. А. (ИГКЭ): У меня вопрос к вашей расширенной системе, в которой может появиться, как Вы сказали, «неожиданный» эффект. Вопрос практически такой: что значит «неожиданный»? Из-за него может возникнуть какое-то третье состояние?

Мурышев К. Е.: «Неожиданный» значит, что в системе ничего не изменилось кроме того, что в ней добавился какой-то малоинерционный резервуар углерода, который слабо реагирует на изменения температуры.

Громов С. А. (ИГКЭ): Правильно я понимаю, что если мы, «человечество», будем удалять ежегодно какое-то количество CO_2 из атмосферы, то может возникнуть вот такой эффект?

Мурышев К. Е.: Мы можем получить этот эффект, если будем удалять CO_2 из атмосферы вот в таком уравнении (ссылка на уравнение).

Попов И. О. (ИГКЭ): У меня вопрос по первым Вашим слайдам. Данные о температуре (и содержании CO_2 и CH_4) были получены по ледовым кернам в Антарктиде. А имеются ли подобные данные по станциям в других местах Земного шара, по Исландии, например. Как там с явлением запаздывания между CO_2 и температурой.

Мурышев К. Е.: К сожалению, я этого точно не знаю. Была работа [Shakun et al., 2012], где рассматривалась не только антарктическая, но и глобальная температура, восстановленная на основании ряда косвенных данных. По некоторым данным антарктическая температура опережает CO_2, а CO_2 опережает глобальную температуру.

Семенов С. М. (председательствующий): Спасибо. Я думаю, что достаточно вопросов по докладу. Александр Викторович, пожалуйста.

Д.г.н. АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ КИСЛОВ (Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова) выступает с комментарием.
Резюме:
•Следует учитывать при формулировке выводов приблизительный характер аппроксимаций предложенными уравнениями реальности, т.е. «точность» уравнений; это позволит получать более «грубые», но и более надежные результаты;

•Необходимо осторожнее распространять выводы на все временные масштабы, так как система уравнений, используемая автором, не универсальна.

***Семенов С.М. (председательствующий)*:** Спасибо, Александр Викторович.
У нас Олег Александрович Анисимов на связи из Санкт-Петербурга. Пожалуйста, Олег Александрович, Вам слово.

Анисимов О.А. (Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург): Спасибо, Сергей Михайлович. Во-первых, я бы хотел отметить особый характер сегодняшнего семинара, который, насколько мне известно, впервые проводится в режиме телеконференции. Это позволило мне, не покидая Санкт-Петербурга, принять полноценное участие в работе семинара. Так получилось, что я сейчас нахожусь на улице профессора Попова, и во время сегодняшней телеконференция я испытывал примерно те же чувства, что и Попов во время первого сеанса радиосвязи в 1894 году. Я очень надеюсь, что и в дальнейшем у нас будет возможность дистанционно участвовать в семинарах ИГКЭ.

Теперь о докладе. Так получилось, что несколько месяцев назад А.В. Елисеев уже рассказывал об этой работе ИФА РАН на семинаре в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте Росгидромета (ААНИИ), и я уже имел возможность с ней ознакомиться. Тогда возник вопрос о том, в какой мере данные наблюдений за продолжительный исторический период соответствуют полученному модельному результату. В ААНИИ этот вопрос остался без ответа, и я бы хотел обратить на это внимание. Результаты, полученные в модели при весьма условных допущениях о периодических воздействиях на климатическую систему, могут отражать лишь модельные автоколебания, если они не подтверждаются данными наблюдений.

Семенов С.М.(председательствующий): Спасибо, Олег Александрович.

Уважаемые коллеги! Время позднее, думаю, что пора поблагодарить Кирилла Евгеньевича Мурышева за интересный доклад на важную тему, Александра Викторовича Кислова за комментарий и всех участников сегодняшнего заседания за активное, заинтересованное участие.