

РЕЦЕНЗИИ

УДК 631.41

НОВОЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА ИЗ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Глаголев М.В.

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Институт лесоведения РАН, пос. Успенское, Московская обл.
Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск*

m_glagolev@mail.ru

Цитирование: Глаголев М.В. 2013. Новое отечественное исследование эмиссии метана из болотных экосистем северной части Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 4. № 2(8). EDCCbrv0005.

«Я должен сказать много лестных слов в адрес Алексея Андреевича, но я не могу говорить лестные слова и потому считайте, что я их сказал».

И.А. Полетаев (цит. по [Титлянова, 2011: с. 22])

ВВЕДЕНИЕ

Болота и изучение эмиссии метана

Интерес к изучению цикла метана и получению точных количественных оценок интенсивности процессов эмиссии и поглощения этого газа на границе почва-атмосфера обусловлен высокой значимостью изменения содержания CH_4 в атмосфере для предсказания тренда глобальных климатических изменений, стремлением к более глубокому пониманию фотохимических процессов, происходящих в атмосфере Земли и необходимостью управления запасами органического углерода на планете [Mikaloff Fletcher et al., 2004]. Метан – важный компонент фотохимической и климатической систем атмосферы. В XX в. скорость возрастания его концентрации достигала 1%/год. Известно, что одним из главных источников метана являются болота [Andronova and Karol, 1993]. С увеличением температуры поверхности возрастает вероятность выхода большого количества CH_4 в атмосферу из болот Западной Сибири, тающей многолетней мерзлоты и метангидратов. Из-за положительной обратной связи имеется вероятность аномально быстрой эмиссии огромного количества метана из вышеперечисленных резервуаров в атмосферу, что соответственно приведет к значительному возрастанию парникового эффекта. Этот вероятный сценарий эмиссии метана в литературе называют «метановой бомбой» [Голицын и Гинзбург, 2007; Жилиба и др., 2011]. Очевидно, что исследование причин столь быстрого возрастания чрезвычайно важно. Представляется, что Россия может быть одним из основных источников метана из-за существенной заболоченности ее территории [Andronova and Karol, 1993].

По-видимому, на территории России наибольший объем информации об эмиссии болотного метана получен в Западной Сибири. Однако и в этом регионе наиболее подробно были исследованы лишь центральные и южные районы – ср., например, [Паников и др., 1993; Глаголев и Шнырев, 2007; Наумов, 2009; Сабреков и др., 2011]. Но природное разнообразие болот определяет существенные различия в проявлении ими средообразующих функций, включая эмиссию парниковых газов вообще и метана в частности [Sirin, 2004]. Относительно массовые измерения (см., например, [Bubier, 1995; Moosavi et al., 1996; Pelletier et al., 2007; Glagolev et al., 2011]) показали, что поток CH_4 из естественных бореальных болот может отличаться на 2-3 порядка. Неопределенность дополнительно усиливается временными вариациями потока, включая межсезонные, внутрисезонные и суточные. Следовательно, вряд ли возможно переносить результаты, полученные при измерениях эмиссии CH_4 из южных болот, на болота северной части Западной Сибири. Таким образом, со всей сложностью встает проблема прямого изучения эмиссии метана на севере.

Используемые сокращения

БЭ – болотные экосистемы;
ПППМ – поверхностная плотность потока метана;
ПЭМ – период эмиссии метана;
ЧПП или NPP – чистая первичная продуктивность.

ДИССЕРТАЦИЯ В.С. КАЗАНЦЕВА – ВКЛАД В ОТЕЧЕСТВЕННУЮ ЭКОЛОГИЮ

Целью диссертационной работы В.С. Казанцева [2013, с. 5] как раз и было: исследовать закономерности эмиссии метана из болот северной части Западной Сибири.

Экспериментальная часть работы выполнялась диссертантом в течение 2008-2010 гг. на 14 ключевых участках, расположенных в тундре, лесотундре и северной тайге Западной Сибири [Казанцев, 2013, с. 52-55].

В диссертации было показано, во-первых, что эмиссии CH_4 из БЭ севера Западной Сибири оценивается примерно в 766 Кт/год, при этом 82% эмиссии приходится на БЭ северной тайги. Среди элементов болотного ландшафта самый большой вклад в эмиссию метана вносят олиготрофные мочажины северной тайги – 439 Кт/год (57% региональной эмиссии). Существенный вклад в региональную эмиссию вносят северотаёжные рямы, сплавины и тундровые эвтрофные болота – около 15, 6 и 7%, соответственно. Во-вторых, на эмиссию метана в масштабе всей территории исследований в наибольшей степени влияет мощность метанпродуцирующего слоя. В меньшей степени влияние оказывают средние значения кислотности и электропроводности приповерхностного слоя болотных вод, средняя температура и мощность метан-окисляющего слоя, а также произведение двух последних параметров. Все перечисленные зависимости носят линейный характер. В-третьих, к концу XXI в. наибольшая эмиссия CH_4 из болот севера Западной Сибири прогнозируется при сценарии SRES A2 на уровне 1070 Кт/год, что превышает современную эмиссию на 39.7%, при этом ожидается, что в течении XXI в. эмиссия будет увеличиваться. Другой тренд изменения эмиссии метана прогнозируется при сценарии SRES B1: в середине XXI в. эмиссия CH_4 ожидается равной 919 Кт/год и к концу XXI в. она останется почти неизменной (на уровне 918 Кт/год). К концу XXI в. наибольшее увеличение эмиссии прогнозируется для северной тайги и тундры [Казанцев, 2013, с. 103-104].

Однако (при в целом положительной оценке работы В.С. Казанцева), считаем необходимым высказать отдельные критические замечания.

НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Мы разделили все замечания на несколько групп, которые расположены ниже в порядке возрастания важности. При этом мы, конечно, не будем заострять внимание читателя на многочисленных орфографических и пунктуационных ошибках, в изобилии имеющихся в рассматриваемой диссертационной работе (см., например, на сс. 7 и 57 в 10-х строках снизу, на с. 20 в 9-ой строке снизу, на с. 76 во 2-ой строке – «так же» вместо «также»; на с. 18 в 10-ой строке снизу – «Влияние УБВ на эмиссию метана рассмотрена...»; в 1-ой строке 1-го вывода на с. 103: «Актуальная эмиссия...»; на с. 107 во 2-ой строке – «географических» и многие другие). Безусловно, от ученого следует требовать лишь безошибочности по существу рассматриваемых им идей и результатов, а не безукоризненного соответствия текста диссертации формальным правилам какого-либо естественного языка. Итак, перейдем к рассмотрению по существу.

Неудачные формулировки

- 1) *Иногда автор довольно странно записывает математические формулы.* Например, на с. 17 в колонке «Результат исследования» Таблицы 2 видим выражение $E = 1,56\text{exp}^{0,3(T)}$ и еще одно аналогичное. В принципе, если автор хотел отобразить таким странным образом функцию

$E = 1,56 \exp(0,3T) = 1,56e^{(0,3T)}$, то, по-видимому, ошибки здесь нет. Ведь пишут же $\sin^2(x)$, что означает синус во второй степени, следовательно, $\exp^{0,3}(T)$ – это $\exp(T)$ в степени 0,3, а это по свойству экспоненты и есть как раз $\exp(0,3T)$. Но, тем не менее, форма записи экспоненциальных функций, избранная автором, весьма необычна и практически нигде сейчас не встречается. Впрочем диссертанту эту странную запись почти совсем не следует ставить в вину, поскольку в указанной таблице он лишь цитирует известную работу [Moosavi et al., 1996], авторы которой, аппроксимируя на Fig. 5 температурную зависимость эмиссии, приводят уж совсем абсурдную запись « $1.56 \exp^{0,30}$ », т.е., вообще забывают о температуре! Однако, исправляя горе-авторов, диссертанту, конечно, следовало бы идти в этих исправлениях до конца и использовать общепринятую в российской научной литературе форму записи экспоненциальных выражений.

- 2) Следом за этим отметим иногда встречающееся в диссертации *отсутствие единообразия в записи математических выражений*. И здесь мы имеем в виду не только и не столько использование общепринятой записи экспоненциальных выражений (см. с. 76) наряду с вышеприведенной странной записью, сколько, например, использование в качестве разделителя десятичных разрядов числа то «.», то «,». Причем последнее нельзя оправдать желанием точного цитирования, поскольку, например, в упоминавшейся выше табл. 2, как мы показали выше, авторы оригинальной работы (т.е. Moosavi et al. [1996]) использовали «.», а диссертант, цитируя их, переписывает числа с использованием «,», но тут же (в самом конце табл. 2), цитируя другую работу, использует уже «.».
- 3) На с. 45 (в строках 10-12) читаем: «На Ямале в подзоне типичных тундр также широко распространены песчаные и супесчаные, что способствует развитию лишайниковых и мохово-лишайниковых тундр». По-видимому, речь идет о песчаных и супесчаных почвах, но, на наш взгляд, это следовало сформулировать в явном виде. Аналогично, на с. 42 (в строках 10-11) читаем: «Долины большинства малых рек представляют собой нередко лишь глубокие канавы с плохо выраженным и склонами...». К сожалению, здесь догадаться – о чем же идет речь, уже сложнее.

Мелкие неточности

- 4) Как это имеет место почти в каждой экологической работе, затрагивающей явления переноса, *диссертант иногда путает понятие «удельного потока» (или, что то же самое, «поверхностной плотности потока») и просто «потока»*. Так, на с. 15, описывая формулу $Q_d = -D \cdot dC/dz$, он указывает, что « Q_d – диффузионный поток воздуха (масса, диффундирующая через единицу площади в единицу времени), D – коэффициент диффузии (имеющий размерность отношения площади ко времени), C – концентрация (масса диффундирующей субстанции в единице объема)». При этом диссертант дает ссылку на известную работу [Walter et al., 1996]. Не обладая глубокими познаниями в английском языке, мы не будем анализировать правильность или неправильность употребления в последней публикации термина «flux». Но в русскоязычной *серьезной научной литературе* потоком массы называют массу, переносимую в единицу времени сквозь заданную поверхность (подчеркнем: *заданную поверхность*, а не поверхность *единичной* площади). Для характеристики потока через отдельные элементы поверхности вводится понятие об *удельном* потоке (поверхностной плотности потока), как о потоке через *единицу* поверхности – см. почти любой университетский курс явлений переноса, например, [Филиппов, 1986, с. 6]. Таким образом, рассматриваемая диссертантом величина Q_d – это *удельный поток* диффузии (или, что то же самое, *поверхностная плотность диффузионного потока*).
- 5) Кстати, как, вероятно, уже заметил внимательный читатель, здесь же в диссертации делается еще одна ошибка (которой, между прочим, в [Walter et al., 1996] нет). Если C – масса диффундирующей *субстанции* в единице объема (а это именно так, и это диссертант отметил совершенно правильно!), то Q_d – *удельный* поток диффузии этой *субстанции*. Поскольку в диссертации обсуждаемая формула вводится для описания диффузионного транспорта *метана* в почве, то, конечно, Q_d – это не

диффузионный поток *воздуха* (как указывает диссертант), а удельный поток диффузии *метана* (как о том пишут Walter et al. [1996, p. 3731]).

- 6) **Иногда диссертант дает неточные ссылки.** Например, на с. 69 после заголовка табл. 18 дана ссылка на некую работу Glagolev et al., 2010, но в списке литературы, использованной в диссертации, такой работы нет (и вообще, нет ни одной англоязычной работы, которая бы начиналась с этой фамилии). Еще аналогичный пример: на с. 90 (в строках 5-10) диссертант пишет: «В качестве основы для прогноза использован обнаруженный Дж. Тэйлором факт существования зависимости эмиссии метана от чистой первичной продуктивности (ЧПП) на ограниченных площадях [Taylor, 1991]. Этим автором было показано наличие линейной зависимости эмиссии метана от ЧПП для пространственных ячеек $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ в глобальном масштабе». Однако в списке литературы, использованной в диссертации, такой работы нет, хотя есть работа Taylor et al. Но тогда нельзя говорить, что указанный факт обнаружен именно Дж. Тэйлором – ведь в авторском коллективе он мог играть совсем другую роль. Впрочем, *ни Тэйлор, ни его соавторы не обнаруживали факт существования зависимости эмиссии метана от ЧПП!* Они лишь *предположили*, что это может иметь место, посетовали, что экспериментальных данных по этому вопросу очень мало и, не приведя даже эти куцые данные, но, призвав экспериментаторов такие данные получить хотя бы для основных экосистем (про ячейки $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ никто даже не мечтал), использовали предполагаемую линейную зависимость в своей математической модели. Вот что на самом деле написано в [Taylor et al., 1991, p. 3024]: «The underlying *assumption* is that some fraction of the NPP of the biosphere decays under anaerobic conditions to produce methane which is then released to the atmosphere. Hence at longitude i , latitude j , and time t we compute the flux of methane f_{ijt} as $f_{ijt} = \alpha_{ijt} \cdot NPP_{ijt}$ where NPP_{ijt} is the amount of dry organic matter synthesized per unit area of the Earth's surface per unit time and α_{ijt} is the fraction of NPP emitted to the atmosphere. For... α_{ijt} , very little information is available... Clearly measurements of α_{ijt} , at least within the major ecosystems, are needed...».
- 7) В продолжение предыдущего замечания укажем, что, переходя от оригинального написания фамилий авторов англоязычных работ к русской транскрипции, диссертант подчас путает окончания. Например, на с. 30 (строки 13-16) читаем: «...Кристенсен использует свои оценки поверхностной плотности потока метана, а так же результаты математического моделирования, а распространение болот взял из модели Е. Мэттью и И. Фанга [Matthew and Fung, 1992]». Во-первых, строго говоря, такая ссылка в тексте – неправильна, поскольку фамилия первого автора не Matthew, а Matthews (как это верно отражено в списке литературы диссертации), следовательно, нельзя было по-русски написать «Мэттью». Во-вторых, Fung – это выдающийся ученый-женщина Inez Fung, следовательно, по-русски, нельзя было писать «И. Фанга». Итак, следовало написать: «...из модели Е. Мэттьюс и И. Фанг» (кстати, Мэттьюс – тоже выдающаяся женщина-ученый).

Логические ошибки

- 8) **В диссертации содержится множество утверждений, которые неверны с точки зрения формальной логики.** Например, в самом конце с. 10 диссертант пишет: «Как видно из таблицы 1, среди различных исследователей нет единого мнения в количественной оценке источников метана» и на с. 11 приводит эту таблицу. Но что же видно из нее? Во-первых, оказывается, что в некоторых случаях, когда оценки различаются, они относятся к разным периодам. Например, Hein et al. (5-я колонка табл.) приводят для болот значение глобального потока CH_4 на уровне 231 Мт/год, а Mikaloff-Fletcher et al. (10-я колонка табл.) – 230 Мт/год. Однако первая оценка относится к периоду 1983-1989 г., а вторая – к 1999 г. Мог ли за 10 лет поток упасть примерно на 0.4%? Интуитивно кажется, что мог. Конечно, в данной таблице можно найти и такие величины, разница между которыми интуитивно кажется непомерно большой. Продолжая только что рассмотренный пример, можно отметить, что Wang et al. (7-я колонка табл.) дают значение 176 Мт/год для 1994 г. Мог ли поток за 5 лет (с 1989 г. до 1994 г.) упасть почти на 24%, а за следующие 5 лет на столько же возрасти? Интуитивно кажется, что – нет. Но сейчас мы обсуждаем не интуицию, а формальную

логику. Нельзя говорить, что у Hein, Mikaloff-Fletcher, Wang и их соавторов нет единого мнения, поскольку они отвечали на разные вопросы – соответственно: (а) какая была эмиссия из болот в 1983-1989 гг., (б) в 1999 г., (в) в 1994 г. Конечно, если бы все эти авторы отвечали на один и тот же вопрос (например: какая была эмиссия из болот в 1983-1989 гг.), то, возможно, они бы действительно дали разные ответы, и тогда (при некоторых условиях, которые мы обсудим ниже) можно было бы говорить, что среди них нет единого мнения. Но вот из табл. 1 диссертации этого-то как раз и не видно! Однако это все было во-первых. А есть еще и во-вторых.

Различие (разность между двумя значениями одной и той же величины) может быть значимым или незначимым. Если различие меньше, чем погрешности результатов, то оно является незначимым [Тейлор, 1985, с. 28]. Многие значения из табл. 1 диссертации в связи с этим оказываются незначимыми! Например, Seiler (3-я колонка табл.) якобы приводит для болот значение глобального потока CH_4 в интервале 25-70 Мт/год, а Bingemer and Crutzen (4-я колонка табл.) – 26-137 Мт/год. Различие незначимо! Действительно, ведь эти оценки пересекаются друг с другом в интервале 26-70 Мт/год, следовательно можно сказать, что у таких авторов, как Seiler, Bingemer и Crutzen есть единое мнение в количественной оценке болот, как глобального источника метана (по табл. 1 диссертации легко убедиться, что у этих авторов есть оно и по всем другим источникам, для которых они приводят интервалы глобальной эмиссии).

Но отсюда неизбежно следует, что *не имеет никакого интереса результат, представленный в виде единственного значения* [Тейлор, 1985, с. 29]. Мы не можем сказать, что величины, даваемые, скажем, Mikaloff-Fletcher et al. (230 Мт/год) и Wuebbles and Nayhoe (100 Мт/год) отличаются друг от друга, поскольку статистическая процедура, которая могла бы привести к такому выводу, опирается на информацию о *разбросе* сравниваемых величин (см. почти любой курс математической статистики, например [Тейлор, 1985, с. 31-34; Дмитриев, 1995, с. 190-197; Мятлев и др., 2009, с. 79-80]), но в данном случае такой информации нет. Однако тут возникает следующий вопрос: неужели этого не понимали выдающиеся ученые, публиковавшие свои оценки в ведущих научных журналах мира – неужели они публиковали лишь ничего не значащие (без разброса) величины? Чтобы ответить на этот вопрос, заглянем в оригинальные работы. Батюшки, что же мы видим!? В [Mikaloff-Fletcher et al., 2004, p. 7] приводится 6 вариантов расчета (т.е. 6 различных значений глобальной эмиссии для каждого источника, в том числе и для болот) причем «минимальный» вариант отличается от «максимального» почти в 2 раза (например, для болот «минимальный» вариант дает 163 ± 62 Мт/год), а «максимальный» – 252 ± 62 Мт/год). Конечно, в зависимости от предположений, положенных в их основу, какие-то варианты расчета оказываются более реалистичными, а какие-то – менее, но подчеркнем, что погрешностью (разбросом) снабжен каждый вариант расчета (для «болотных» вариантов разброс в каждом случае составляет от 25 до 38%). Теперь обратимся к [Wuebbles and Nayhoe, 2002]. Вообще говоря, это обзор. Так что авторы его не дают какой-то свой метод оценки глобальной эмиссии, а суммируют результаты других исследователей. В любом случае, если мы посмотрим на Table 1 в [Wuebbles and Nayhoe, 2002], то, действительно, в колонке «Emissions» увидим приводимое диссертантом число 100 Мт/год, но... вот же – соседняя колонка («Range of estimate»), и в ней мы видим разброс: 92-232 Тг/год. Итак, если (как это по непонятной причине делает диссертант) отбросить разбросы, даваемые авторами оригинальных работ, то мы имеем, вроде бы, некоторое несогласие между, например, [Mikaloff-Fletcher et al., 2004] и [Wuebbles and Nayhoe, 2002]: соответственно 230 и 100 Мт/год. Но если учесть более чем 30%-ную погрешность оценки в первом случае и разброс от 92 до 232 Тг/год – во втором, то вывод изменится прямо на противоположный: оценки эмиссии болотного метана из [Mikaloff-Fletcher et al., 2004] и [Wuebbles and Nayhoe, 2002] полностью согласуются!!!

Но неужели во всех случаях диссертант для доказательства своей точки зрения просто не обратил внимание на то, что, во-первых, многие оценки давались для разных периодов времени и, во-вторых, отбросил разбросы величин, имевшиеся в оригинальных публикациях? Конечно, нет! Если хорошо поискать в его таблице, то можно найти оценки эмиссии, действительно сильно различающиеся у разных авторов. Например, сравним оценку, которую дали Ehhalt and Schmitt (2-я колонка табл.) – 192-300 Мт/год и якобы дал Seiler (3-я колонка табл.) – 25-70 Мт/год. Казалось бы, уж эти-то данные однозначно доказывают, что разные ученые имеют разные мнения относительно эмиссии метана из болот. Нет, и они не доказывают! Если мы посмотрим на годы публикации указанных работ, то

обнаружим, что первая вышла из печати в 1978 г., т.е. тогда, когда практически никаких измерений (кроме самых первых единичных) еще вообще не было сделано, а вторая – якобы в 1986 г., когда в некоторых регионах измерения велись довольно активно, но некоторые (как, например, один из крупнейших болотных регионов мира – Западная Сибирь) еще совершенно не были исследованы в плане эмиссии CH_4 . Как изменилось мнение авторов самых первых работ, когда они познакомились с более современными исследованиями, мы в точности не знаем. Так что на основании сравнения работ, отстоящих друг от друга от 8 до 32 лет, говорить, что разные ученые не имеют единого мнения – нельзя. Более того, можно полагать, что раз Ehhalt and Schmitt в дальнейшем, когда появились более надежные современные оценки, не отстаивали свою завышенную оценку, а Seiler – свою заниженную, то это означает, что они были согласны с новыми оценками.

Прежде чем сделать по этому пункту наших замечаний окончательный вывод, разберем еще один пример – положение диссертанта, которое он формулирует на с. 12 (в строках 6-10): «Единственное, на чём сходятся все авторы, приведённые в таблице 1, так это то, что болота являются основным природным источником метана, но и при этом оценки вклада болот в глобальную эмиссию колеблются от 105 млн. т/год [Seiler, 1986^a] до 230 млн. т/год [Mikaloff-Fletcher et al., 2004], то есть разница в оценках около 2х раз». Да не колеблются оценки! Sara E. Mikaloff-Fletcher в 1986 г. была, в лучшем случае, школьницей (причем – не старших классов). Она вряд ли вообще имела какое-то представление о глобальных эмиссиях метана, а если и имела, то это представление могло лишь основываться на работах тогдашних корифеев, в частности на работах Вольфганга Сэйлера. А когда в 2003 г. она защитила свою эпохальную диссертацию (именно материалы этой диссертации, как известно, легли в основу статьи [Mikaloff-Fletcher et al., 2004]) никто уже не мог сбросить со счетов этот важнейший вклад – оценки глобальных эмиссий, полученные не при помощи примитивной и неточной инвентаризации (сильно зависящей от количества измерений эмиссии для каждого типа источников), а посредством решения обратной задачи, что позволило по атмосферным измерениям и картографическим материалам восстановить распределение и мощность источников на поверхности Земли. Однако, вскрылась очередная странность: в табл. 1 диссертант приписывал Сэйлеру глобальную эмиссию из болот в интервале 25-70 Мт/год (3-я колонка табл.), а теперь (в 9 строке на с. 12) – 105 Мт/год. Пытаясь познать истину, мы хотели обратиться к первоисточнику, но оказалось, что Сэйлера диссертант цитирует, так сказать, «из вторых рук» – по работе [Khalil and Rasmussen, 1990]. Обратившись же к последней работе, мы обнаружили, что... в списке литературы этой статьи нет работы Сэйлера 1986 г. Тогда что вообще обсуждать? Кстати, в другой известной работе того же автора за тот же год (а именно: [Holzapfel-Pschorn and Seiler, 1986]) на основании анализа множества публикаций приводятся довольно широкие интервалы для всех типов источников, что вполне естественно для тех стародавних времен, когда экспериментальных данных было еще очень мало, и это оставляло широкий простор для теоретических спекуляций. В частности, для болот в указанной статье приводятся глобальные оценки от 13 до 190 Мт/год.

Таким образом, несмотря на утверждение диссертанта о том, что собранные им в табл. 1 данные говорят об отсутствии единого мнения о количественной оценке источников метана среди различных исследователей, эта табл. отражает, скорее, не нынешнее разнообразие мнений, а эволюцию взглядов научного сообщества: каждый из исследователей делал какой-то маленький шаг по пути от первоначальных совершенно необоснованных оценок к современным, подкрепленным многочисленными данными, в результате чего в настоящее время мы имеем уже некоторый консенсус в этой области. Надо сказать, что диссертант и сам почти уже подошел к этой мысли, поскольку на с. 12 (строки 10-12 снизу) написал следующее: «Примечательно, что оценки глобальной эмиссии в исследованиях последних 10 лет разнятся не так сильно (менее чем в 1,2 раза)». За исключением того, что ничего примечательного здесь нет (это же абсолютно естественно!) сказано совершенно верно. И отсюда следует тезис, как раз противоположный изначальному утверждению автора, а именно: в настоящее время практически достигнуто единство мнений различных ученых на величины глобальных эмиссий (ведь разница в 1.2 раза представляется не очень существенной).

- 9) Еще одна логическая ошибка. В самом начале с. 17 читаем: «В табл. 2 приведены зависимости эмиссии метана от температуры почвы и различных слоёв торфа, полученные разными исследователями». Далее как раз следует таблица с этими зависимостями, а потом (в 1-ом абзаце

с. 18) поясняется: «...в приведенных зависимостях удельный поток метана всегда находится в положительной зависимости от температуры торфа, так как с повышением температуры активизируются процессы метаболизма в микробном сообществе». Что же здесь неправильно? **Из того, что активизируются процессы метаболизма в микробном сообществе не следует однозначно положительная зависимость эмиссии от температуры.** Ведь на с. 15 (в строках 8-12 снизу) диссертант совершенно справедливо отмечает: «...цикл метана в болотах включает в себя как продуцирование метана, так и его потребление, при этом итоговый поток метана в атмосферу очень сильно зависит от вида транспорта метана, будь то диффузия, пузырьковый транспорт или транспорт, связанный с растительностью». Таким образом, влияние температуры на эмиссию можно ожидать довольно сложным. Для упрощения рассмотрим только два первых процесса – продуцирование метана и его потребление. Если температурный отклик метанпотребляющего сообщества сильнее, чем у метанобразующего (а это вполне может быть при достаточно мощном окислительном слое), то из активизации процессов метаболизма в микробном сообществе с повышением температуры – большей активизации в метанпотребляющем сообществе (!) – будет следовать не положительная, а отрицательная (!!!) зависимость эмиссии от температуры.

- 10) **Довольно странным и нелогичным выглядит использование «квадратичного» и «экспоненциального» регрессионных уравнений** (для описания зависимости эмиссии от факторов среды) после того, как диссертантом была показана применимость линейной модели, **поскольку априори ясно, что эти уравнения (в том виде, который выбрал диссертант) окажутся неприменимы.** Обосновывая выбор вида регрессионных уравнений, диссертант на с. 76 (начиная со строки 12 и далее до конца страницы) пишет «Согласно публикациям, в которых исследовалось влияние характеристик внешней среды на поверхностную плотность потока метана, мы проверяли линейную зависимость переменной Flux+1 от трёх типов функции независимых переменных:
- линейной функции [Bubier et al, 1995; Torn and Chappin, 1993; Сабреков и др., 2011].
 - квадратичной функции [Сабреков и др., 2011].
 - экспоненциальной функции [Bubier, 1995; Pelletier et al, 2007; Moosavi et al, 1996].

Соответственно, регрессионные уравнения в общем виде для каждого случая выглядят следующим образом.

1. Линейная функция:

$$\text{Flux}+1 = \text{const} + a \cdot \text{Lpr} + b \cdot \text{Lox} + c \cdot \text{Trp} + d \cdot \text{Tox} + f \cdot \text{pH} + g \cdot \text{O}_2 + h \cdot \text{Ec} + j \cdot (\text{Lpr} \cdot \text{Trp}) + k \cdot (\text{Lox} \cdot \text{Tox}).$$

2. Квадратичная функция:

$$\text{Flux}+1 = \text{const} + a \cdot (\text{Lpr})^2 + b \cdot (\text{Lox})^2 + c \cdot (\text{Trp})^2 + d \cdot (\text{Tox})^2 + f \cdot (\text{pH})^2 + g \cdot (\text{O}_2)^2 + h \cdot (\text{Ec})^2 + j \cdot (\text{Lpr} \cdot \text{Trp})^2 + k \cdot (\text{Lox} \cdot \text{Tox})^2.$$

3. Экспоненциальная функция:

$$\text{Flux}+1 = \text{const} + a \cdot e^{(a1 \cdot \text{Lpr})} + b \cdot e^{(b1 \cdot \text{Lox})} + c \cdot e^{(c1 \cdot \text{Trp})} + d \cdot e^{(d1 \cdot \text{Tox})} + f \cdot e^{(f1 \cdot \text{pH})} + g \cdot e^{(g1 \cdot \text{O}_2)} + h \cdot e^{(h1 \cdot \text{Ec})}.$$

Здесь a, b, c, d, f, g, h, j, k и const – подбираемые коэффициенты, а Ec (электропроводность болотных вод, $\mu\text{См} \cdot \text{см}^{-1}$), Lox и Lpr (мощности метанооксиляющего и метанпродуцирующего слоев, см)¹, pH (кислотность болотных вод), Tox и Trp (средние температуры «метанооксиляющего» и «метанпродуцирующего» слоев, °C), O₂ (среднее содержание кислорода в болотных водах, мг·л⁻¹) – независимые переменные.

Откуда вообще берутся в естественно-научных исследованиях полиномиальные зависимости? Пусть некоторая функция F зависит от n факторов, которые можно выразить величинами x_1, x_2, \dots, x_n . Эти величины всегда можно представить в виде $x_1 = X_1 + h_1, x_2 = X_2 + h_2, \dots, x_n = X_n + h_n$ (или в более компактной векторной записи: $\mathbf{x} = \mathbf{X} + \mathbf{h}$). Иначе говоря, в общем случае каждый фактор можно представить в виде суммы некоторого начального значения и отклонения от него (конечно, в частности, можно принять нулевые начальные значения, тогда $\mathbf{x} = \mathbf{h}$). Если из каких-то (физических, биологических и т.п.) соображений мы можем предположить конкретный вид зависимости $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, то можно попытаться работать именно с этой зависимостью. Однако если аналитический вид её не известен или очень сложен, то можно воспользоваться разложением F в ряд Тейлора.

¹ В тексте диссертации эти переменные названы именно так, но не указано – как эти мощности определялись. На защите же, состоявшейся 12.11.2013, диссертант, отвечая на вопросы, доложил, что на самом деле Lox – это уровень стояния болотных вод, а Lpr – расстояние от этого уровня до нижней границы торфяной залежи.

Зафиксируем $X \in \mathbb{R}^n$, $h \in \mathbb{R}^n$, тогда:

$$F = F(X) + \sum_{j=1}^n h_j \cdot (\partial F / \partial x_j)|_{x=X} + (2!)^{-1} \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_j \cdot h_k \cdot (\partial^2 F / \partial x_j \partial x_k)|_{x=X} + (3!)^{-1} \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n h_j \cdot h_k \cdot h_l \cdot (\partial^3 F / \partial x_j \partial x_k \partial x_l)|_{x=X} + \dots$$

Эта формула довольно громоздка и «взывает» о более компактной записи, которая, говоря словами Дьёдонне, «изгнала бы орды индексов» [Хайрер и Ваннер, 2008, с. 320-321]. Однако общая структура формулы весьма проста:

$F =$ Постоянный член + Линейные члены + Квадратичные члены + Члены высших порядков.

Если h_1, h_2, \dots, h_n не слишком велики, то мы находимся вблизи точки X . Следовательно, значение функции будет не слишком сильно отличаться от $F(X)$ и, значит, в вышеприведенной формуле можно не использовать члены высокого порядка. Если отбросить члены, начиная с кубических, то приближенно будем иметь:

$$F \approx F(X) + \sum_{j=1}^n h_j \cdot (\partial F / \partial x_j)|_{x=X} + (2!)^{-1} \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_j \cdot h_k \cdot (\partial^2 F / \partial x_j \partial x_k)|_{x=X}. \quad (1)$$

Чтобы наше довольно общее изложение было бы более понятным, рассмотрим конкретный пример.

Для описания экспериментальных данных по измерениям скорости микробной минерализации в почве (F) Panikov et al. [1992, p. 281, 282] использовали уравнение

$$F(x_1, x_2) = V \cdot (a + b \cdot x_1 + c \cdot x_1^2) \cdot x_2 / (K + x_2),$$

где x_1 – влажность почвы, x_2 – концентрация глюкозы; V, a, b, c, K – параметры (V и K – положительны). Аппроксимируем это уравнение при помощи ряда (1) близ точки $X(0, 0)$. При этом

$$F(X) = F(0, 0) = V \cdot (a + b \cdot 0 + c \cdot 0^2) \cdot 0 / (K + 0) = 0;$$

$$\partial F / \partial x_1|_{x=X} = V \cdot (b + 2 \cdot c \cdot x_1) \cdot x_2 / (K + x_2)|_{x=X} = V \cdot (b + 2 \cdot c \cdot 0) \cdot 0 / (K + 0) = 0;$$

$$\partial F / \partial x_2|_{x=X} = V \cdot (a + b \cdot x_1 + c \cdot x_1^2) \cdot K / (K + x_2)^2|_{x=X} = V \cdot (a + b \cdot 0 + c \cdot 0^2) \cdot K / (K + 0)^2 = V \cdot a / K;$$

$$\partial^2 F / \partial x_1^2|_{x=X} = 2 \cdot V \cdot c \cdot x_2 / (K + x_2)|_{x=X} = 2 \cdot V \cdot c \cdot 0 / (K + 0) = 0;$$

$$\partial^2 F / \partial x_2^2|_{x=X} = -2 \cdot V \cdot (a + b \cdot x_1 + c \cdot x_1^2) \cdot K / (K + x_2)^3|_{x=X} = -2 \cdot V \cdot (a + b \cdot 0 + c \cdot 0^2) \cdot K / (K + 0)^3 = -2 \cdot V \cdot a / K^2;$$

$$\partial^2 F / \partial x_1 \partial x_2|_{x=X} = V \cdot (b + 2 \cdot c \cdot x_1) \cdot K / (K + x_2)^2|_{x=X} = V \cdot (b + 2 \cdot c \cdot 0) \cdot K / (K + 0)^2|_{x=X} = V \cdot b / K.$$

Тогда,
$$F(x_1, x_2) \approx (V \cdot a / K) \cdot x_2 - (V \cdot a / K^2) \cdot x_2^2 + (0.5 \cdot V \cdot b / K) \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (2)$$

Как видим, и в общем виде (формула 1), и в только что разобранным частном примере (формула 2) в квадратичной модели также присутствуют и линейные члены. Может ли их не быть? Да. Но, очевидно, это возможно лишь тогда, когда $(\partial F / \partial x_j)|_{x=X} = 0$ для всех $j = 1, 2, \dots, n$. Опыт показывает: при исследовании реальных природных процессов функции, такие, что $(\partial F / \partial x_j)|_{x=X} = 0$ для какого-либо j , встречаются довольно редко. Но пусть даже это имело бы место в половине случаев (т.е. вероятность составляла бы 0.5). Однако, поскольку в «квадратичную модель» диссертанта входит 7 независимых переменных (Ес, Lpg, Lox, рН, Trg, Tox, O2), то необходимым условием ее адекватности будет равенство нулю первых производных от Flux по каждой из этих переменных. И если вероятность каждого такого равенства мы (очень сильно завьисив ее) приняли равной 0.5, то вероятность одновременного выполнения всех равенств составит $0.5^7 \approx 0.008$. Ничтожно малое число! Как видим, даже при самых оптимистичных оценках, вероятность встретиться с такой уникальной моделью, на идентификацию которой диссертант потратил свое время и силы, составляет менее одной сотой. Т.е. сразу можно было сказать, что с огромной вероятностью модель эта окажется

никуда не годной. Естественно, аналогичные рассуждения применимы и к столь же экзотической «экспоненциальной модели» диссертанта, которая, таким образом, столь же невероятна, как и его квадратичная модель. Поэтому немудрено, что диссертант на с. 77 (в строках 3-4) пишет: «Экспоненциальная зависимость... обнаружена не была». Также он отвергает и свою «квадратичную функцию» (см. последний абзац на с. 77), правда, дает этому ошибочное объяснение, которое мы рассмотрим ниже – в п. 13.

Однако, как видим, при выборе квадратичной функции диссертант ссылается на [Сабреков и др., 2011]. Но А.Ф. Сабреков известен как серьезный юный ученый... Неужели он мог предложить такую нелепую зависимость для описания эмиссии? С замиранием сердца открываем его статью, и... Что и требовалось доказать! В [Сабреков и др., 2011] нет не только квадратичной функции, но и вообще нету ни одной формулы!!!

А что же со ссылками на «экспоненциальную функцию»? В [Bubier, 1995] есть экспоненциальная зависимость Flux только от одного параметра, обозначенного там через HMWT и представляющего собой положение уровня воды в данный момент времени относительно среднего уровня стояния воды. Если через WTL обозначить, как это обычно делается, уровень стояния воды относительно поверхности болота, то HMWT можно линейно связать с WTL. Если вода стоит не выше поверхности почвы, то WTL совпадает с Lox (в обозначениях диссертанта). Таким образом, можно обосновать экспоненциальную зависимость Flux ~ exp(b1·Lox), хотя и с некоторой натяжкой². В [Pelletier et al, 2007] также есть экспоненциальная зависимость Flux только от одного параметра (WTL ~ Lox), из числа перечисленных диссертантом.

В [Moosavi et al, 1996] есть экспоненциальная зависимость Flux только от одного параметра – от средней температуры почвы в слое 0-40 см (T). Точно связать ее в каждый момент времени с параметрами, использованными в диссертации, не получится, но очевидно, что при Lox < 40 см приближенно она будет складываться из Tpr и Tox, взятых с какими-то весовыми коэффициентами (ниже мы обозначим их, соответственно, C и D). Но тогда, если использовать формулу для Flux из [Moosavi et al, 1996] и подставить в нее Tpr и Tox из диссертации, то мы получим

$$\ln(\text{Flux}) = A \cdot T + B \approx A \cdot (C \cdot T_{pr} + D \cdot T_{ox}) + B \Rightarrow \text{Flux} = \exp(A \cdot C \cdot T_{pr} + A \cdot D \cdot T_{ox} + B) = \text{const} \cdot e^{(c1 \cdot T_{pr})} \cdot e^{(d1 \cdot T_{ox})},$$

где const = e^B, c1 = A·C, d1 = A·D. При этом мы не утверждаем, что формула из [Moosavi et al, 1996] – правильная. Просто мы показываем, что диссертант зря ссылается на эту работу – если бы он действительно опирался на нее, то пришел бы к необходимости перемножения, а не суммирования членов в своей «экспоненциальной модели».

Но отвлечемся на секунду от работ, процитированных диссертантом, и зададим себе вопрос: а есть ли в мировой экологической литературе экспоненциальные модели, одновременно содержащие зависимости эмиссии метана от нескольких параметров? Конечно! Например, в [Dise et al., 1993] приведена зависимость эмиссии (увеличенной на единицу, как и в рассматриваемой диссертации) от температуры, уровня воды и индекса гумифицированности Ван Поста. Но зависимость эта выражается, конечно, произведением экспонент, а не суммой, как у диссертанта.

Итак, мы показали, что ни в одной из процитированных диссертантом работ, на которые он ссылается для обоснования весьма экзотической формы своей «экспоненциальной модели», уравнений такого вида нет. Безусловно, индивидуальные экспоненциальные зависимости эмиссии метана от температуры или уровня стояния воды в литературе неоднократно отмечались. Но в литературе модели, учитывающей оба эти параметра, содержат экспоненциальные члены в виде произведения, а не суммы, как это имеет место в рассматриваемой диссертации.

² С некоторой натяжкой потому, что по физическому смыслу всегда при стоянии воды выше поверхности болота должно быть Lox = 0, а HMWT (и WTL) будут продолжать изменяться – тем больше, чем выше стоит вода. Впрочем, уровни воды выше поверхности болота наблюдаются в реальности довольно редко, так что они почти не будут портить функциональную связь между Lox и WTL. Кроме того, из текста диссертации совершенно непонятно, действительно ли Lox имеет такой смысл, или Lox – это всего лишь иное название для WTL (т.е. тогда Lox ≡ WTL), как было заявлено во время публичной защиты диссертации.

Более существенные ошибки

- 11) В первом абзаце на с. 59 читаем: «Поверхностная плотность потока метана рассчитывали методом линейной регрессии с весами для положительных потоков и нелинейной регрессии для отрицательных потоков. Расчет отрицательных значений ПППМ проводили в программе Microsoft Office Excel при помощи функции *SimpLinRegWe*, которая учитывает нелинейную динамику уменьшения концентрации метана в измерительной камере». Как это справедливо указывает диссертант, функция *SimpLinRegWe* и пояснения к ней опубликованы в [Глаголев и др., 2010: с. 94-101]. Таким образом, изучив текст программы каждый сможет убедиться: ***SimpLinRegWe* осуществляет лишь линейную регрессию с весами и в противоположность тому, что заявил диссертант, она НЕ учитывает нелинейную динамику уменьшения концентрации метана в измерительной камере.** Тогда сразу же возникает вопрос: как же рассчитывались отрицательные значения ПППМ?
- 12) Далее в последнем абзаце на с. 59 диссертации читаем: «Продолжительность периода эмиссии метана... в стандартной модели соответствует периоду биологической активности (ПБА) (по О.Н.Бирюковой) в каждой исследуемой природной подзоне. Продолжительность ПБА определяется как длительность периода, в течение которого температура воздуха устойчиво превышает 10 °С, а запас продуктивной влаги составляет не менее 1-2%...». Это не совсем так. Понятие ПЭМ подробно рассмотрено в работе [Глаголев, 2008, с. 182-183, 186], на которую, кстати, диссертант ссылается. Но посмотрим, что же там на самом деле написано: «...когда говорят о ПБА, то подразумевают биохимические и микробиологические процессы в поверхностном слое почвы. Метаногенные же организмы обитают в более глубоких слоях... Поэтому представляется логичным, что интенсивность процессов метанобразования будет определяться не температурой воздуха, а температурой почвы. Кроме того, введенная в определении классического ПБА температура (10 °С), видимо, все-таки, не может быть одной и той же для почв тундры и степи. ...**оптимальная** температура метаногенеза закономерно снижается в высоких широтах и около 70° с.ш. составляет около 10 °С (раз речь идет сейчас об оптимальной температуре, то, естественно, биологическая активность проявляется уже при значительно меньших температурах). ...мы вычислили «истинные» суммарные потоки из каждого местообитания и, разделив их на соответствующие медианы, нашли ПЭМ. Оказалось, что определенные таким образом ПЭМ в среднем немного (около 10%) превышают продолжительность осенне-летнего периода...». Очевидно, что на крайнем севере ПБА по Бирюковой неприменим для содержательных расчетов, поскольку температура воздуха никогда не превышает устойчиво 10 °С. ПЭМ же возможно вычислить для любой географической точки, поскольку это, фактически, продолжительность летне-осеннего периода. Таким образом, нет однозначной связи между ПБА и ПЭМ (для различных значений ПЭМ может оказаться, что ПБА = 0, следовательно, по ПБА невозможно однозначно определить ПЭМ).
- 13) На с. 77 диссертации (строки 9-6) читаем: «Обращает на себя внимание, что порядок коэффициентов в квадратичных зависимостях составляет $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-4}$. С учётом того, что сами значения исследуемых параметров относительно невелики, можно утверждать, что реально эти зависимости не квадратичные, а линейные». Это – довольно странное утверждение. **Вопрос о возможности замены квадратичной функции линейной на каком-либо отрезке не может быть решен на основании одной лишь малости коэффициентов.** Более того, малость коэффициентов вообще не имеет к решению этого вопроса никакого отношения. Действительно, можно перейти к другим единицам измерения и значения коэффициентов возрастут. В качестве простейшего примера рассмотрим зависимость удельного потока (*Flux*, мг·м⁻²·час⁻¹) от мощности метанпродуцирующего слоя (*Lpr*), выраженной в см: $Flux = c + a \cdot Lpr^2$. Пусть коэффициент $a \sim 10^{-2}$ мг·м⁻²·час⁻¹·см⁻². Но если мы будем измерять *Lpr* в метрах, то численное значение a возрастет в 10⁴ раз и составит, таким образом, 10² мг·м⁻⁴·час⁻¹. Но тогда как же решить вопрос о допустимости/недопустимости использования линейной функции вместо квадратичной. Очень просто. Пусть мы имеем две функции: $Flux_1(Lpr) = c_1 + a_1 \cdot Lpr$ и $Flux_2(Lpr) = c_2 + a_2 \cdot Lpr^2$. Найдем абсолютное значение их разности: $|Flux_1(Lpr) - Flux_2(Lpr)| = |c_1 + a_1 \cdot Lpr - c_2 - a_2 \cdot Lpr^2|$. Зависимые и независимые переменные (т.е. *Flux* и

Lpr) в реальных экспериментах измеряются с некоторой погрешностью. Если с учетом таких реальных погрешностей разность $|\text{Flux}_1(\text{Lpr}) - \text{Flux}_2(\text{Lpr})|$ значительно не отличается от нуля, значит можно ограничиться только линейным членом.

Единственное существенное замечание

14) Прежде всего отметим, что почти все вышеприведенные ошибки почти никак не сказываются на результатах диссертационной работы. Действительно, могут ли результаты измениться от того, что диссертант назвал «удельный поток» просто «потоком»? И даже если диссертант неправильно рассчитывал отрицательные потоки, то в силу того, что они встречаются крайне редко, это вряд ли могло нанести большой ущерб результатам. Пожалуй, единственное что несколько снижает научную ценность работы – это использование для региональной оценки карты Романовой и др.. Однако, поскольку речь идет о квалификационной работе (и диссертант должен всего лишь доказать некоторый уровень своего профессионализма, достаточный для присвоения кандидатской степени, а не обязательно внести выдающийся вклад в науку), то и сформулированное ниже замечание не может повлиять на в целом высокую оценку работы. Тем не менее, приходится отметить, что полученные диссертантом величины региональных эмиссий метана в свете современных знаний представляются сильно заниженными. И виновата в этом использованная им карта Романовой и др. Эмиссия CH_4 из БЭ северной тайги Западной Сибири оценивается диссертантом примерно в $0.82 \cdot 766 = 628$ Кт/год. Это почти совсем не отличается от результата, полученного ранее по карте Романовой и др. [1977] авторами стандартной модели – см. [Glagolev et al., 2011]. Но карта Романовой и др. весьма неточная, что на одном конкретном примере продемонстрировали Д.В. Ильясов и др. [2012], а для всей таежной зоны – I.E. Kleptsova et al. [2013]. В последней работе показано, что при использовании наиболее точной на сегодняшний день карты³ болотных ландшафтов Западной Сибири региональная оценка годовой эмиссии с таежной зоны возрастает на 87%! Если же говорить только о подзоне Северной тайги, то указанная карта увеличивает эту оценку на 59% – см., например, [Глаголев и др., 2012]. Остается только пожалеть, что диссертант затратил силы и время на оцифровку устаревшей неточной карты.

ВЫВОД

Несмотря на перечисленные выше мелкие и мельчайшие замечания, рассматриваемая работа выполнена на требуемом уровне и заслуживает присуждения диссертанту степени кандидата биологических наук (по специальности «Экология»). Образно можно сказать, что диссертационная работа В.С. Казанцева – одна из самых ярких жемчужин в и без того прекрасном ожерелье диссертационных работ, выполненных на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова».

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор признателен В.С. Казанцеву (Институт физики атмосферы РАН), обратившему его внимание на рассмотренную здесь интересную диссертацию.

ЛИТЕРАТУРА

Глаголев М.В. 2008. Эмиссия метана: идеология и методология «стандартной модели» для Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сборник научных трудов кафедры ЮНЕСКО Югорского государственного университета. Вып. 1 / Глаголев М.В., Лапшина Е.Д. (ред). Новосибирск: НГУ. С. 176-190.

Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. 2010. Физикохимия и биология торфа. Методы измерения газообмена на границе почва-атмосфера. Томск: Изд-во ТГПУ. 104 с.

Глаголев М.В., Филиппов И.В., Клепцова И.Е. 2012. Болота как источники метана на территории России // «Биогеоэкология и ландшафтная экология: итоги и перспективы»: материалы IV международной конференции, посвященной памяти Ю.А. Львова (28-30 ноября 2012 г., Томск). Томск: ТГУ. С. 29-33.

³ Данная карта была получена с помощью контролируемой классификации набора снимков Landsat (68 сцен) 30-ти метрового разрешения. Легенда карты включает 45 типов болотных ландшафтов (например, грядово-мочажинный комплекс, плоско-бугристый комплекс), для каждого из которых, эмпирически установлено соотношение 7 основных типов микроландшафтов (например, гряда, мочажина), существенно отличающихся с точки зрения количества выделяемого ими метана.

Глаголев М.В. 2013. Новое отечественное исследование эмиссии метана из болотных экосистем... // ДОСигИК. Т. 4. № 2(8).

- Глаголев М.В., Шнырев Н.А. 2007. Динамика летне-осенней эмиссии CH_4 естественными болотами (на примере юга Томской области) // Вестник МГУ, сер. Почвоведение. №1. С. 8-15.
- Голицын Г.С., Гинзбург А.С. 2007. Оценки возможности "быстрого" метанового потепления 55 млн. лет назад // Доклады РАН. Т. 413. №6. С. 816-819.
- Дмитриев Е.А. 1995. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во МГУ. 320 с.
- Жилиба А.И., Вандышева Г.А., Грибанов К.Г., Захаров В.И. 2011. Глобальные изменения климата: «метановая бомба» – наукообразный миф или потенциальный сценарий? // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 2. № 1(3). EDCCrev0001.
- Ильясов Д.В., Клепцова И.Е., Глаголев М.В. 2012. Классификация болотных ландшафтов и ее применение для расчетов эмиссии метана на примере подзоны средней тайги // Болота и биосфера: материалы VIII Всероссийской с международным участием научной школы (10-15 сентября 2012 г., Томск). Томск: Изд-во ТГПУ. С. 185-190. Также доступна по URL: http://torf.tspu.ru/files/Materiali_8_schkoool.pdf (дата обращения 23.08.2012).
- Казанцев В.С. 2013. Эмиссия метана из болотных экосистем северной части Западной Сибири: Дис. ... к-та биол. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова.
- Мятлев В.Д., Панченко Л.А., Ризниченко Г.Ю., Терехин А.Т. 2009. Теория вероятностей и математическая статистика. Математические модели. М.: Издат. центр «Академия». 320 с.
- Наумов А.В. 2009. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 208 с.
- Паников Н.С., Титлянова А.А., Палеева М.В., Семенов А.М., Миронычева-Токарева Н.П., Макаров В.И., Дубинин Е.В., Ефремов С.П. 1993. Эмиссия метана из болот юга Западной Сибири // ДАН. Т. 330. №3. С. 388-390.
- Романова Е.А., Быбина Р.Т., Голицына Е.Ф. и др. 1977. Типологическая карта болот Западно-Сибирской равнины. Л.: ГУГК.
- Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Башкин В.Н., Барсуков П.А., Максютлов Ш.Ш. 2011. Вклад мерзлотных бугров в эмиссию метана из болот тундры Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 2. № 2(4). EDCCrar0002. Статья также доступна по адресу: http://www.ugrasu.ru/uploads/files/EDCC_2_2_Sabrekov.pdf (дата обращения: 16.11.13).
- Тейлор Дж. 1985. Введение в теорию ошибок. М.: Мир. 272 с.
- Титлянова А.А. 2011. Первая школа по математической биологии в 1973 г. Пушкино: ИФХиБПП РАН. 32 с.
- Филиппов Л.П. 1986. Явления переноса. М.: Изд-во МГУ. 120 с.
- Хайпер Э., Ваннер Г. 2008. Математический анализ в свете его истории. М.: Научный мир. 396 с.
- Andronova N.G., Karol I.L. 1993. The contribution of USSR sources to global methane emission // Chemosphere. V. 26. P. 111-126.
- Bubier J. 1995. The relationship of vegetation to methane emission and hydrochemical gradients in northern peatlands // Journal of Ecology. V. 83. P. 403-420.
- Dise N.B., Gorham E., Verry E.S. 1993. Environmental Factors Controlling Methane Emissions from Peatlands in Northern Minnesota // Journal of Geophysical Research. V. 98. No. D6. P. 10583-10594.
- Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov S., Machida T. 2011. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // Environ. Res. Lett. V. 6. N. 4. 045214. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045214. Также доступна по URL (дата обращения 08.12.2011): http://iopscience.iop.org/1748-9326/6/4/045214/pdf/1748-9326_6_4_045214.pdf
- Holzappel-Pschorn A., Seiler W. 1986. Methane Emission During a Cultivation Period From an Italian Rice Paddy // Journal of Geophysical Research. V. 91. P. 11803-11814.
- Khalil M.A.K., Rasmussen, R.A. 1990. Constraints on the global sources of methane and an analysis of recent budgets // Tellus. V. 42B. P. 229-236.
- Kleptsova I., Maksyutov S., Glagolev M. 2013. Wetland classification based on Landsat and its application for methane emission inventory of West Siberian taiga zone // Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-630. EGU General Assembly 2013 (Vienna, Austria, 7-12 April 2013). URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013EGUGA..15..630K> (дата обращения: 11.05.2013).
- Mikaloff Fletcher S.E., Tans P.P., Bruhwiler L., Miller J.B., Heimann M. 2004. CH_4 sources estimated from atmospheric observations of CH_4 and its $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic ratios: 1. Inverse modeling of source processes // Global Biogeochem. Cycles. V. 18. GB4004. DOI:10.1029/2004GB002223.
- Moosavi S.C., Crill P.M., Pullman E.R., Funk D.W., Peterson K.M. 1996. Controls on CH_4 flux from an Alaskan boreal wetland // Global Biogeochemical Cycles. V. 10. No. 2. P. 287-296.
- Panikov N.S., Blagodatsky S.A., Blagodatskaya J.V., Glagolev M.V. 1992. Determination of microbial mineralization activity in soil by modified Wright and Hobbie method // Biology and Fertility of Soils. V. 14. Issue 4. P. 280-287. DOI: 10.1007/BF00395464
- Pelletier L., Moore T.R., Roulet N.T., Garneau M., Beaulieu-Audy V. 2007. Methane fluxes from three peatlands in the La Grande Rivière watershed, James Bay lowland, Canada // J. Geophys. Res. V. 112. G01018. DOI:10.1029/2006JG000216
- Sirin A.A. 2004. Boreal peatlands functions within water and carbon cycle: temporal and spatial aspects // Wise use of peatlands: Proceedings of the 12th International Peat Congress. V. 1. pp. 80-86.
- Taylor J.A., Brasseur P.R., Zimmerman P.R., Cicerone R.J. 1991. A Study of the Sources and Sinks of Methane and Methyl Chloroform Using a Global Three-dimensional Lagrangian Tropospheric Tracer Transport Model // Journal of Geophysical Research. V. 96. P. 3013-3044.
- Walter B.P., Heimann M., Shannon R.D., White J.R. 1996. A process-based model to derive methane emissions from natural wetlands // Geophysical Research Letters. V. 23. No. 25. P. 3731-3734.
- Wuebbles D.J., Hayhoe K. 2002. Atmospheric methane and global change // Earth-Science Reviews. 57. P. 177-210.

Поступила в редакцию: 25.11.2013