

АННОТИРОВАННЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ CH₄ И CO₂ НА БОЛОТАХ РОССИИ

Глаголев М.В.

*Институт экологического почвоведения, г. Москва
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск*

m_glagolev@mail.ru

Аннотированный библиографический список отражает экспериментальные исследования обмена углерода между болотами и атмосферой, проводившиеся на территории России. Представлены публикации, содержащие результаты измерений удельного потока диоксида углерода и/или метана. Всего аннотированный список содержит около 200 публикаций.

Ключевые слова: метан, диоксид углерода, эмиссия, NEE, NEP, NPP, GPP.

«На этот счет мне не положено думать, мне положено пользоваться теми данными, которые встречаются в рецензируемых журналах».

Г.А. Заварзин, 2001: с. 996

ВВЕДЕНИЕ

Состав атмосферы решающим образом зависит от активности наземной растительности и почвенных микроорганизмов [Christensen et al., 2000]. В условиях роста содержания парниковых газов в атмосфере большое значение приобретает определение текущего баланса основных парниковых газов и прогноз их изменений на ближайшее десятилетие. Основной проблемой при прогнозировании будущих изменений климата является, помимо объективного учета антропогенного воздействия, сохраняющаяся неопределенность в оценках объема эмиссии и стока этих газов, обусловленных естественными факторами [Зинченко с соавт., 2007]. Климатические изменения с неизбежностью вызывают модификации процессов обмена парниковых газов, что может приводить к появлению как положительных, так и отрицательных обратных связей в системе экосистема-атмосфера-климат [Честных с соавт., 2007].

Как следует из публикаций, начиная с 1992 г., значительные колебания скорости роста метана, в основном связаны с колебаниями интенсивности его эмиссии и стока на увлажненных и заболоченных территориях [Зинченко с соавт., 2007]. Сегодня климаторегулирующая роль естественных болот как источников/поглотителей парниковых газов общеизвестна [Сирин и Чистотин, 2007]. Естественные болота являются важным компонентом экосистем Северного полушария: занимая лишь около 3% площади поверхности земной суши, они являются огромными хранилищами почвенного органического углерода (по существующим оценкам – около 20% всего почвенного органического углерода на планете) [Christensen et al., 2000]. К сожалению, как справедливо отмечают Сирин и Чистотин [2007], «несравненно меньше данных по величине потоков CO₂ и CH₄ с осушенных и используемых торфяников – единственных болотных объектов, потенциально учитываемых в составе обязательств по Киотскому протоколу. ...им посвящены лишь немногочисленные зарубежные и единичные отечественные исследования». В то же время, в России значительные площади болот в Европейской части, на Дальнем Востоке и в Западной Сибири к настоящему времени мелиорированы. Такие болота использовались для разнообразной хозяйственной деятельности, требующей снижения уровня стояния воды: добычи торфа (на площади до 1.5 млн. га), сельского хозяйства (более 3 млн. га) и гидроресомелиорации (также более 3 млн. га). Кроме того, многие болота по всей стране подвержены влиянию хозяйственной деятельности человека более опосредованно – через них проходят дороги, трубопроводы и т.п., изменившие в некоторой степени их гидрологию и потоки парниковых газов [Sirin et al., 2009a].

Инвентаризация парниковых газов для некоторых экосистем может сводиться только к учету чистого обмена CO₂ с атмосферой и экспорта углерода растворенных органических веществ. Но существуют и такие экосистемы, в которых наблюдается существенный обмен с атмосферой других парниковых газов, например, CH₄ и N₂O. Болота относятся именно к таким экосистемам [Friborg et al., 2003]. Причем в отношении метана они оказываются весьма важным источником, поскольку обуславливают около 30% ежегодной глобальной эмиссии этого газа в атмосферу [Vourlitis and Oechel, 1996].

В связи с возможным влиянием возрастающих концентраций CO_2 и CH_4 на глобальный энергетический бюджет атмосферы, для количественного учета наземных источников/стоков CO_2 и CH_4 были предприняты значительные усилия. Предварительный анализ распределения глобального потока CH_4 показал, что более половины годовой эмиссии из болот приходится на те из них, что расположены между 50 и 70° с.ш. [Vourlitis and Oechel, 1996], а это соответствует географическому расположению России.

В России площадь торфяников составляет 8%, а вместе с заболоченными мелкоотторфованными землями возрастает до 20%. Таким образом, среди всех стран мира Россия обладает самыми обширными площадями торфяников, следовательно, можно ожидать, что среди этих экосистем именно болота России будут играть наиболее значительную роль в обмене парниковыми газами с атмосферой [Sirin et al., 2009a]. Действительно, если говорить вообще о болотах Северного полушария, то главнейшими источниками метана среди них являются болота на территории России, Канады и Аляски, обуславливающие, соответственно, 64%, 11% и 7% от всей эмиссии из болот Северного Полушария. Инвентаризации мощностей источников и стоков метана в бореальных, субарктических и арктических болотах уделялось существенное внимание в различных научных проектах, таких как, например, «Arctic Boundary Layer Experiment (ABLE)» и «Canadian Northern Wetlands Study (NOWES)». Результаты, полученные при реализации этих проектов, стали широко доступны научному сообществу благодаря публикациям в специальных выпусках «Journal of Geophysical Research» и в других ведущих научных журналах [Vourlitis and Oechel, 1996]. Понятно, что обзорные публикации опирались, главным образом, на эти статьи. В результате между различными географическими областями создался существенный дисбаланс подробности представления потоков парниковых газов в научной литературе. Приведем лишь два примера.

Из 25 значений удельных потоков CH_4 , измеренных в арктических/субарктических экосистемах и представленных в обзоре [Vourlitis and Oechel, 1996], 21 значение (т.е. 84%) оказывается полученным на территории Аляски; а из 34 значений, измеренных в бореальных болотах и представленных в том же обзоре, 23 значения (т.е. около 68%) оказываются полученными на территории Канады (ср. с приведенными выше долями вклада Аляски и Канады в эмиссию из болот Северного Полушария). Поэтому не является удивительным тот факт, что оценки эмиссии CH_4 , полученные экстраполяцией от исследовательского полигона до регионального масштаба, дают для болот в полосе от 50 до 70° с.ш. величины, различающиеся у разных исследователей более чем в 2 раза – от 25-35 $\text{TgCH}_4/\text{год}$ [Aselmann and Crutzen 1989; Fung et al., 1991] до более чем 65 $\text{TgCH}_4/\text{год}$ [Matthews and Fung, 1987]. Такой значительный разброс, вероятно, обусловлен отчасти тем, что при получении этих оценок практически совсем не учитывались экспериментальные данные, полученные на территории России (вместо них использовались те или иные экстраполяции – различные у разных авторов). Причем это касается не только метана. На рис. 1 показано географическое расположение мест тех измерений почвенного дыхания, которые вошли в известную базу данных Bond-Lamberty and Thomson [2010].

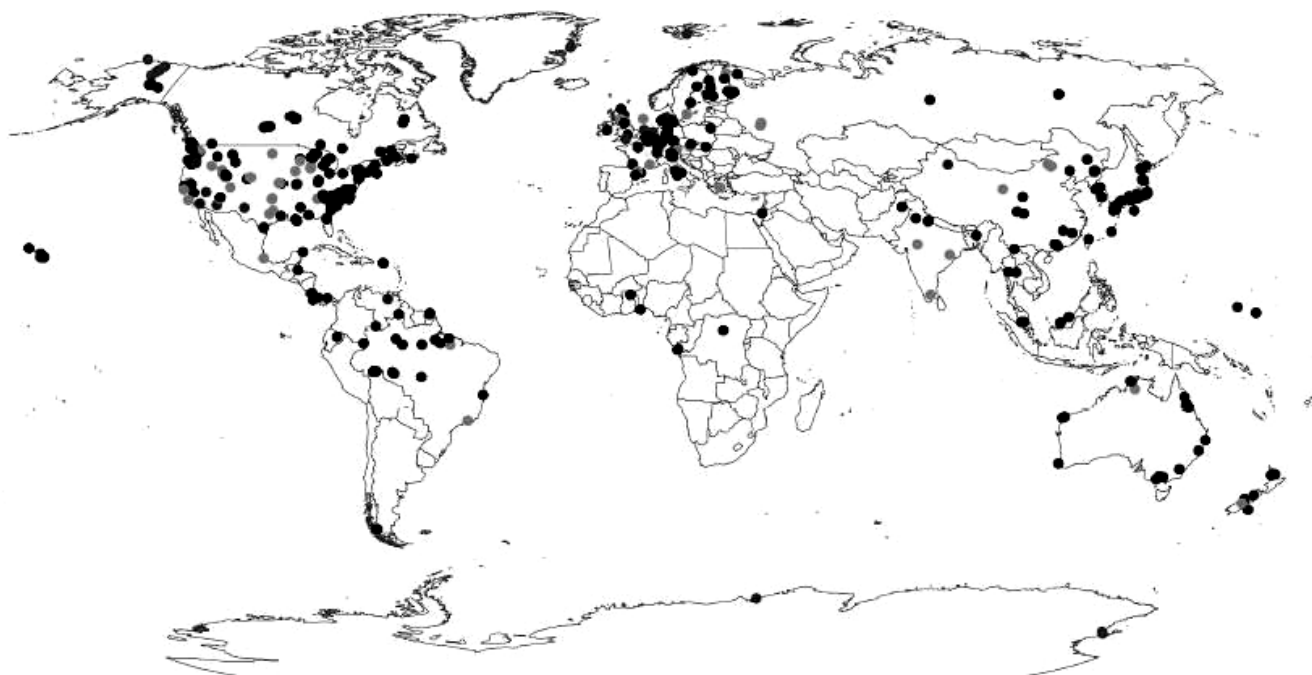


Рис. 1. Места измерений почвенного дыхания, вошедшие в базу данных [Bond-Lamberty and Thomson, 2010].

Однако болотам России свойственно высокое разнообразие: от полигональных болот на вечной мерзлоте – до олиготрофных, мезотрофных и эвтрофных болот тайги, подтайги, степи и полупустынь. Понятно, что такое разнообразие должно давать и существенную разницу в удельных потоках CO_2 и CH_4 [Sirin et al., 2009a]. На самом деле в России за последние 10-20 лет действительно было осуществлено большое число измерений удельных потоков CO_2 и CH_4 . Но результаты этих измерений публиковались главным образом в российских национальных научных журналах и материалах конференций, из-за чего они оказались практически недоступны для международного научного сообщества (а если говорить о материалах конференций невысокого статуса, то они подчас недоступны и для отечественных специалистов). Поэтому нами **была поставлена следующая цель: создать базу данных тех литературных источников, в которых опубликованы сведения по обмену болот с атмосферой CO_2 и метаном**, полученные на территории России. Отражением такой базы данных является аннотированный список, публикуемый ниже.

Более того, поскольку для выявления закономерностей функционирования болотных экосистем и оценки влияния их на биосферу необходимо проводить комплексное изучение различных режимов: оценку углеродного баланса, скорости накопления углерода, гидротермического режима, метеорологические наблюдения, геохимические исследования торфяной залежи и т. д. [Головацкая и Дюкарев, 2007], то база данных, безусловно, не сводится только к набору удельных потоков, но (по возможности) каждая запись включает в себя вышеперечисленную информацию, если, конечно, она сообщалась авторами в оригинальной публикации. Отчасти эта дополнительная информация нашла отражение и в аннотированном списке, что, с одной стороны, несколько увеличило его объем, но с другой стороны, надеемся, сделало его более полезным для читателя.

Однако существующие разные представления о том, что считать болотами, не позволяют однозначно представить список работ, относящихся к этой области. Мы постарались его максимально расширить.

Например, среди наземных экосистем России, в первую очередь, тундры и леса являются значимым биосферным резервуаром и обменным фондом парниковых газов [Честных с соавт., 2007]. Однако в то время, как одни исследователи (такие, как Б.Н. Городков, В.Н. Андреев, Н.Я. Кац, А.А. Корчагин, Н.И. Пьявченко) полагали, что в тундре есть лишь отдельные участки, которые можно считать болотами, другие (В.Б. Сочава, Ф.В. Самбук, E. Mathews, I. Fung), фактически, ставили знак равенства между понятиями «тундра» и «болото» [Боч, 1974; Vourlitis and Oechel, 1996]. Для наших целей больше подходит вторая точка зрения.

Для удобства поиска публикации приводятся в алфавитном порядке (по первому автору), а работы одних и тех же авторов упорядочены по дате публикации. Помимо рецензируемых изданий, мы были вынуждены включить в обзор тезисы и материалы конференций, поскольку оказалось, что именно там сосредоточен основной массив информации по данной тематике на территории России. Более того, в процессе нашей работы обнаружилось, что некоторые весьма серьезные и интересные результаты до настоящего времени никогда не публиковались где-либо кроме почти совершенно недоступных материалов конференций. Пожалуй одним из самых ярких примеров, иллюстрирующих это утверждение, является информация по автоматическим системам измерения метана камерным методом, разработанным под руководством проф. Г. Иноуэ (G. Inoue) и эксплуатируемым с 1997 г. по настоящее время в Западной Сибири. Данная информация никогда не публиковалась в рецензируемых (да и вообще каких-либо) научных журналах, но зато в ежегодных «Proceedings of the ... Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia...» каждый год выходило сразу несколько статей, посвященных как описанию самой установки и полученным с ее помощью результатам, так и другим работам экологического плана, проведенным в месте расположения автоматизированной системы. Учитывая, что на территории России это единственная автоматическая система для измерения эмиссии метана камерным методом (и одна из немногих в мире), мы сочли необходимым уже теперь дать информацию о ней, не дожидаясь того светлого дня, когда группа проф. Г. Иноуэ (G. Inoue) наконец соизволит опубликовать результаты в каком-либо серьезном научном журнале. В любом случае, даже если какие-либо тезисы или материалы конференций окажутся для читателя недоступными, упоминание о них дает представление о том, какие научные группы где, когда и чем занимались.

Еще одно замечание. Совершенно очевидно, что в рамках одного обзора невозможно охватить все публикации, посвященные результатам измерений потоков CH_4 и CO_2 на болотах России (в частности, подчеркнем, что наш список не охватывает публикации, тематика которых ограничена исследованием процессов потребления и образования CO_2 и CH_4 на почвенных микроскомах, экспериментальным изучением фотоассимиляции, оценкой динамики резервуаров углерода в экосистеме). Однако мы постарались упомянуть работы всех известных нам исследовательских групп, работавших в области экспериментального измерения потоков CO_2 и CH_4 на болотах России непосредственно в природных

условиях (охваченный в нашем обзоре временной отрезок стартует с самого начала 90-х гг. XX-го в.)¹. Опыт показывает, что отдельная научная группа редко меняет направление исследований, поэтому по ее выборочным публикациям можно составить впечатление об объектах и методах ее работы. Мы считаем, что этого уже достаточно, чтобы читатель сделал для себя вывод – интересны ли ему исследования данной конкретной группы. И в том случае, если у нас подобраны далеко не все ее публикации, читатель при современных технологиях информационного поиска без труда сможет сам (по приведенным у нас в разделе ЛИТЕРАТУРА фамилиям) найти наиболее важные из них².

При составлении аннотированного списка по возможности мы старались как можно ближе следовать аннотациям, которые были даны самими авторами, но при отсутствии таковых, аннотации полностью были составлены нами, причем обычно мы придерживались следующей схемы – указывали где, что, каким методом и когда измерялось, а далее очень кратко обычно приводили результаты (кроме того, если публикация содержала не только оригинальные данные, но и полезные литературные ссылки по рассматриваемой теме, то это также отмечалось в аннотации с указанием географических областей, к которым относились ссылки).

Поначалу мы хотели совершенно воздержаться от комментариев с интерпретацией или оценками информации, имеющейся в источниках. Но, встречая в реферируемых статьях все больше и больше нелепостей (с нашей точки зрения), пришли к выводу, что, хотя в публикации такого типа, как «аннотированный список», мы не имеем права навязывать читателю свою точку зрения, тем не менее, с другой стороны, дезинформировать читателя, представляя ему некоторые откровенно абсурдные положения оригинальных работ, мы также не должны. В результате мы пришли к необходимости провести следующее разделение: основной текст списка составляют аннотации, излагающие содержание источников, а наши экспертные оценки оригинальных результатов и выводов выделены в подстрочные комментарии.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ТЕРМИНЫ

Терминология биологического круговорота углерода

В экологии с «биологическим круговоротом углерода» почти полностью отождествляются такие термины и понятия, как валовая первичная продукция, валовое дыхание, чистая первичная продукция, чистая продукция экосистем [Карелин и Замолодчиков, 2008, с. 11]. К сожалению, в разных публикациях (в т.ч. и тех, которые входят в наш «Аннотированный список») можно встретить несколько различные определения этих понятий, либо определения по сути своей могут быть практически одинаковыми, но объяснение одного источника настолько сильно отличается от объяснения другого, что суть эту увидеть достаточно сложно. С другой стороны, указанные понятия, безусловно, составляют некоторую систему. Поэтому мы решили³ изложить сначала эту строгую систему, следуя [Одум, 1986, с. 117-118]⁴, а потом дать несколько комментариев к ней (которые читателем могут быть опущены почти безо всякого ущерба).

GPP – (Gross Primary Productivity [Odum, 1983], Gross Primary Production [Карелин и Замолодчиков, 2008, с. 10] или Gross Photosynthesis) валовая первичная продуктивность [Одум, 1986]. Это общая скорость фотосинтеза, включая те органические вещества, которые за время измерений были израсходованы на дыхание. Данную величину в отечественной литературе называют также «общей ассимиляцией», «валовым фотосинтезом» [Одум, 1986, с. 117-118] (что соответствует английским терминам «total assimilation» и «total photosynthesis» [Odum, 1983]), а также просто «первичной продукцией».

¹ Что вполне естественно, поскольку оформление современной России, как независимого государства произошло лишь в начале 90-х гг. Поэтому в обзоре измерений удельных потоков газов в *России* логично было начать именно с этого момента. Очень удобным оказалось то, что измерения удельных потоков метана из болотных почв действительно начались приблизительно в это время, а измерения удельных потоков CO₂, хотя и проводились существенно раньше, но не имели того массового характера, который они стали приобретать, опять же, с начала 90-х гг.

² Конечно, материалы конференций и другие непериодические издания, как правило, не отражаются в наиболее используемых реферативных базах данных. Русскоязычные публикации намного более полно охватывает база данных ВИНТИ, но, насколько нам известно, ни одна зарубежная библиотека или научное учреждение не имеет подписки на эту библиографическую базу. В любом случае, если у читателей возникнут какие-либо трудности в поиске публикаций конкретных авторов, мы готовы предоставить адреса электронной почты авторов оригинальных публикаций.

³ Решение это было подсказано одним из Рецензентов, за что авторы ему очень благодарны.

⁴ Кроме трех понятий (GPP, NEP и NPP) Одум [1986, с. 118] говорит еще о «вторичной продуктивности», справедливо понимая под ней скорость накопления энергии на уровнях консументов. Однако, поскольку это понятие в статьях из нашего «Аннотированного списка», к счастью, не встречается, мы не будем утомлять им читателя.

NPP – (Net Primary Productivity [Odum, 1983]) чистая первичная продуктивность⁵ (или, иначе, нетто-первичная продукция [Заварзин, 2000]: Net Primary Production). Представляет собой скорость накопления органического вещества в растительных тканях за вычетом того органического вещества, которое использовалось при дыхании растений за изучаемый период. Эту величину называют также «наблюдаемым фотосинтезом» или «чистой ассимиляцией» [Одум, 1986, с. 118] (что соответствует английским терминам «apparent photosynthesis» и «net assimilation» [Odum, 1983]).

NEP – (Net Productivity of a Community [Odum, 1983]) «чистая продуктивность сообщества (экосистемы)» (или, иначе, «нетто-экосистемная продукция» [Заварзин, 2000]: «Net Ecosystem Production» [Bleuten and Lapshina, 2001; Sawamoto et al., 2000, 2001; Vasiliev and Naumov, 2001; Vasiliev et al., 2001]). Представляет собой скорость накопления органического вещества, не потребленного гетеротрофами (т. е. чистая первичная продукция минус потребление гетеротрофами) за учетный период, обычно за вегетационный период или за год [Одум, 1986, с. 118].

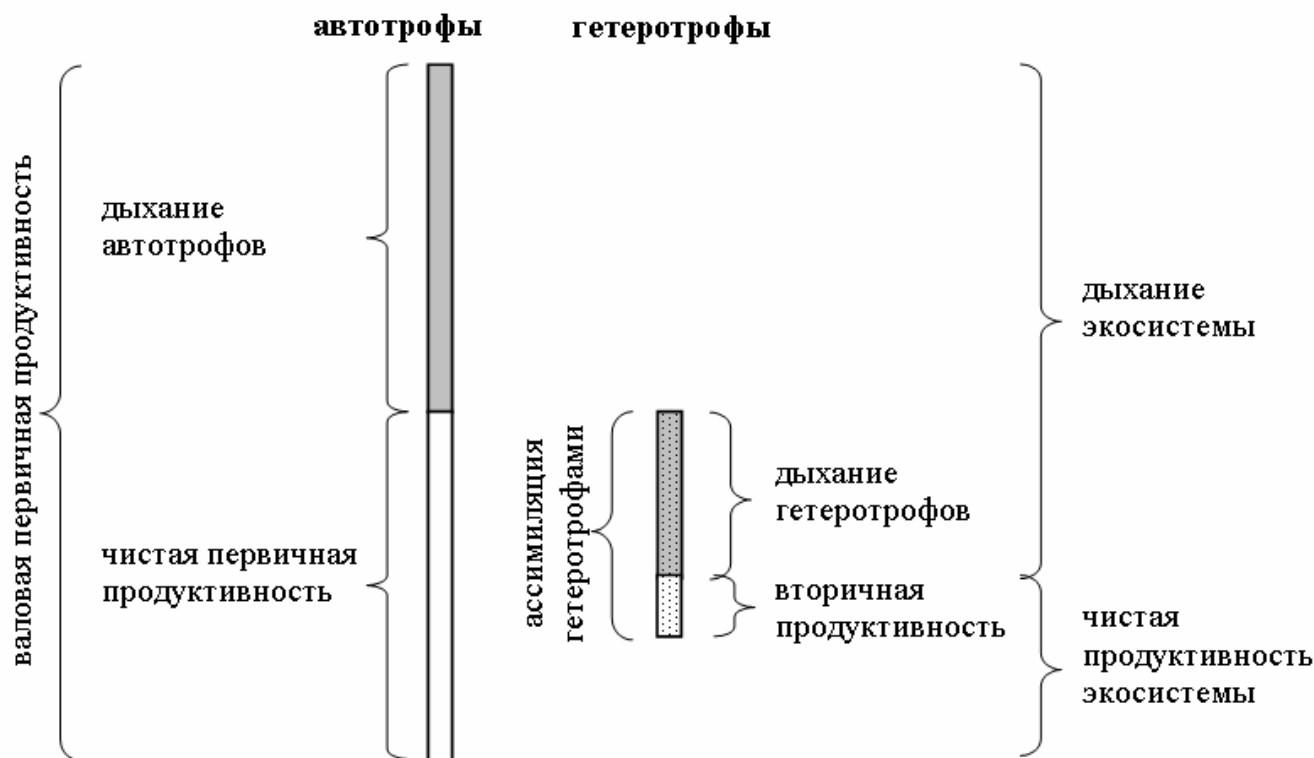


Рис. 2. Взаимосвязь понятий «валовая первичная продуктивность», «чистая продуктивность сообщества (экосистемы)» и «чистая первичная продуктивность» (по [Вудвелл, 1972], с изменениями).

Примечание: высота столбиков соответствует не размеру резервуаров углерода в экосистеме (таких, как биомасса автотрофов, биомасса гетеротрофов), а *мощности потоков* между резервуарами.

Все вышеназванные показатели, образующие систему, являются прямыми интегральными характеристиками интенсивности биологических *процессов*. Величиной, относимой к площади и времени при расчете всех характеристик продуктивности, может быть энергия (тогда возможна оценка эффективности использования поступающей энергии), масса углерода или масса сухого органического вещества. Наглядное представление об этих показателях может дать рис. 2. Также в экологической литературе (и, в том числе, в некоторых публикациях, вошедших в наш «Аннотированный список») широко используется еще несколько понятий:

R_{eco} – валовое дыхание (Gross Respiration, Ecosystem Respiration) – сумма дыхания автотрофов и гетеротрофов, т.е. скорость окисления органических продуктов всей биотой [Карелин и Замолотчиков, 2008, с. 11] (в отечественной литературе этот показатель называют также

⁵ Согласно акад. Г.А. Заварзину [2000], иногда у разных авторов возникает некоторая неопределенность между употреблением величин NPP и NEP. В частности, мы обнаружили подобную путаницу даже в работах выдающихся ученых. Например, на одной и той же стр. 121 Bleuten and Lapshina [2001] пишут: «Накопление углерода в чистой продукции экосистем (NEP) было рассчитано по чистой первичной продукции (NPP)...» и чуть ниже: «Чистая первичная продукция (NEP) изученных...», но у них это, конечно, не ошибка, идущая от непонимания существа вопроса, а лишь досадная описка.

«экосистемным дыханием»). В частности, для болот, согласно Ikkonen et al. [2001], экосистемное дыхание включает в себя дыхание растений, эмиссию CO_2 из торфа и из подстилки.

NEE – нетто-экосистемный обмен (или, иначе, чистый обмен CO_2 между экосистемой и атмосферой, чистый обмен экосистемы диоксидом углерода, чистый экосистемный обмен⁶): NEE – Net Ecosystem Exchange. Согласно Wofsy et al. [1993] под NEE понимается скорость выделения диоксида углерода из экосистемы в атмосферу. В отличие от вышеприведенных показателей, образующих систему, NEE можно назвать *феноменологическим* показателем. Для выражения чистого обмена CO_2 между экосистемой и атмосферой масса сухого органического вещества не применима (также вызывает практически непреодолимые сложности применение для этих целей энергии). В связи с этим удобно использовать во всех показателях биологического круговорота углерода *пересчет на массу углерода*. Действительно, такие единицы, как $\text{кгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ применимы и для GPP, и для NEP, и для NPP, и для NEE (конечно, в общем виде следует говорить о единицах массы углерода, отнесенных к единице площади в единицу времени, т.е. все перечисленные показатели могут быть выражены не обязательно в $\text{кгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$, а, например, в $\text{мгС}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$).

AR – дыхание надземных частей растений ($\text{кгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$) [Sawamoto et al., 2000, 2001].

RR – дыхание корней ($\text{кгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$) [Sawamoto et al., 2000, 2001].

Теперь дадим обещанные комментарии. Карелин и Замолотчиков [2008, с. 10]⁷ определяют GPP как скорость образования органического вещества в тканях автотрофов (в основном представленных зелеными растениями). Как видим, по биологическому смыслу это совпадает с данным выше определением Ю. Одума. Согласно [Vasiliev and Naumov, 2001]⁸ GPP практически может быть рассчитана как разность между дневным потоком CO_2 и независимо определенным дыханием в темноте.

С математической точки зрения, NPP представляет собой разность между GPP и дыханием автотрофов (последнее складывается из дыхания зеленой части мхов, надземной части и корневой системы сосудистых растений [Vasiliev and Naumov, 2001]), т.е. $\text{NPP} = \text{GPP} - \text{AR} - \text{RR}$ [Sawamoto et al., 2000, 2001]. Это совпадает с определением Заварзина [2000]: NPP соответствует разности между первичной продукцией⁹ (т.е. всем углеродом, ассимилированным растением) и дыханием растения, иначе говоря, NPP соответствует количеству углерода, перешедшему в биомассу растений¹⁰. Согласно [Vasiliev and Naumov, 2001], величина

⁶ Последний термин, равно как и иногда встречающийся в литературе еще один краткий вариант: «чистый обмен экосистемы», дают менее ясное представление о смысле показателя.

⁷ Далее Карелин и Замолотчиков [2008, с. 10] пишут «за единицу времени, обычно за год». Очевидная опечатка: либо слово «скорость» здесь лишнее, либо лишним является выражение «за единицу времени».

⁸ К сожалению, идейно очень простые расчеты величин углеродного баланса на практике часто запутываются из-за того, что одни авторы подразумевают под ними абсолютные величины удельных потоков углерода, а другие при помощи знака (минуса или плюса) обозначают направление потока вещества (соответственно, например, в экосистему из атмосферы или из экосистемы – в атмосферу). Это необходимо четко осознавать в балансовых расчетах вообще и при реализации данной практической рекомендации из [Vasiliev and Naumov, 2001], в частности. Введем следующие обозначения: F_C – дневной удельный поток CO_2 , F_T – удельный поток дыхания в темноте. Каковы знаки этих величин? Однозначно можно определить $F_T > 0$ (т.к. этот поток направлен из экосистемы в атмосферу) и $\text{GPP} < 0$ (т.к. образование органического вещества в тканях автотрофов происходит из-за поступления углерода в экосистему из атмосферы). Знак F_C может быть любым, поскольку $F_C = F_T + \text{GPP}$. Отсюда очевидно, что $F_C - F_T = \text{GPP}$. Однако в дальнейшем мы вынуждены будем пожертвовать этой правильной трактовкой, чтобы не создавать путаницы.

⁹ Обращаем внимание читателей на то, что в ряде публикаций для обозначения чистой первичной *продуктивности* употребляются и словосочетания, содержащие термин «*продукция*» вместо «продуктивность», как мы это уже видели выше. Следовать такому употреблению нежелательно. Оптимальным является использование для двух разных показателей с разными единицами измерения отдельных терминов. Соотношение между терминами «продуктивность» и «продукция» хорошо видно у Whittaker et al. [1975, p. 4]: «Чистая первичная *продуктивность* (*productivity*) обычно измеряется как количество сухого органического вещества, синтезированного на единицу площади поверхности Земли за единицу времени, и выражается в граммах на квадратный метр в год. <...> Чистая *продукция* (*production*) <...> выражается в тоннах <...> сухого вещества в год». Таким образом, как можно видеть, с физической точки зрения «продуктивность» соответствует понятию «удельного потока», а «продукция» – понятию «потока» (с этими физическими понятиями можно ближе познакомиться в любом курсе теории явлений переноса, например, в курсе Филиппова [1986]; мы еще раз и чуть подробнее обсудим этот важный вопрос ниже – в следующем разделе). Итак, подчеркнем, что «продукция» обозначает только интегральную по площади величину (например: «Чистая первичная *продукция* болот России составляет ~0.1 *Пг С в год*»).

¹⁰ И Заварзин [2000], и Vasiliev and Naumov [2001] забывают добавить «за единицу времени», т.е.: NPP соответствует количеству углерода, перешедшему в биомассу растений за единицу времени, или NPP соответствует тому количеству углерода, которое запасается экосистемой в виде органического вещества за единицу времени. Мы благодарны Рецензенту, указавшему на этот недостаток в вышеприведенных определениях.

NPP соответствует тому количеству углерода, которое запасается экосистемой в виде органического вещества, однако при такой формулировке показатель может быть понят как результат деятельности всех компонентов экосистемы, а не только автотрофов, что существенно отличается от общепринятых представлений.

Vasiliev and Naumov [2001] определяют NEP как разность между NPP и дыханием гетеротрофов (последнее складывается из дыхания грибов и бактерий). Это, по сути, совпадает с определением Заварзина [2000], согласно которому NEP представляет собой разность между NPP и потерей углерода в деструкционных процессах, прежде всего на дыхание микроорганизмов-деструкторов. Sawamoto et al. [2000, 2001] дают несколько иное определение: $NEP = GPP - AR - SR = GPP - AR - RR - OMD = NPP - OMD$, где SR – дыхание почвы ($\text{кгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$); OMD – поверхностная плотность потока CO_2 , образующегося при разложении органического вещества почвы ($\text{кгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$). По сути дела, такое же определение дают Карелин и Замолотчиков [2008, с. 11]. Согласно Sawamoto et al. [2001], по физическому смыслу NEP – это чистое потребление CO_2 за год системой «почва-растение».

Согласно [Archibald et al., 2009; Connolly et al., 2009], нетто-экосистемный обмен представляет собой разность¹¹ валовой первичной продукции и экосистемного дыхания: $NEE = GPP - R_{eco}$. Однако в общем случае это не так. Пусть $F(\text{HCO}_3^-)$ – нетто-экспорт растворенных гидрокарбонатов (знак этой величины будем выбирать аналогично тому, как он выбирался для чистого обмена CO_2 между экосистемой и атмосферой: положительным, если поток направлен из системы и отрицательным – в противоположном случае). Тогда за единицу времени через единицу поверхности *из* экосистемы выносятся масса неорганического углерода, равная $NEE + F(\text{HCO}_3^-)$. Если определить A как скорость *производства* неорганического С в абиогенных процессах, то суммарный нетто-источник неорганического углерода равен $-GPP + R_{eco} + A$ (под общей первичной продуктивностью понимается неотрицательная величина – количество углерода, связанного в единицу времени). Вышесказанное позволяет записать для данной системы уравнение материального баланса неорганического С: $-GPP + R_{eco} + A = NEE + F(\text{HCO}_3^-) + dC_i/dt$ (C_i – количество неорганического углерода в экосистеме). Если теперь сделать допущения о нулевом нетто-экспорте HCO_3^- из системы, нулевой суммарной мощности абиогенных источников и стоков неорганического С и постоянном запасе неорганического углерода в системе, то получим: $NEE = -GPP + R_{eco}$ или, эквивалентно, $NEE = -NEP$.

Другие сокращения

БД – база данных.

ВБУ – водно-болотные угодья.

ГМК – грядово-мочажинный комплекс.

ГМОК – грядово-мочажинно-озерковый комплекс.

ДДЗ – данные дистанционного зондирования.

ЕТР – Европейская территория России.

ИП – «исследовательский полигон» (соответствует понятию «site» в англ. научной литературе).

МГС – малые газовые составляющие.

МиВП – микровихревые пульсации (= «eddy covariance»)¹². Техника пульсационных измерений позволяет непосредственно фиксировать нетто-экосистемный обмен CO_2 между подстилающей поверхностью и атмосферой и получать оценки углеродного баланса для различных временных интервалов [Выгодская с соавт., 2003] в средних и крупных пространственных масштабах¹³.

пгт. – поселок городского типа.

Рям - сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз (такой фитоценоз известен как «рям» в Сибири).

¹¹ Вообще говоря, в работе [Archibald et al., 2009] говорится не о разности, а о сумме, но подчеркивается, что GPP и R_{eco} имеют разные знаки. С нашей точки зрения это совершенно правильно (потокам из системы, т.е. дыханию, принято придавать знак «+», а потокам в систему – знак «-»). Однако поскольку большинство авторов забывают об этом и оперируют, фактически, с абсолютными значениями всех составляющих углеродного баланса, мы, чтобы не создавать путаницы, скрепя сердце, решили следовать большинству.

¹² Один из Рецензентов познакомил нас со следующими отечественными синонимами этого термина: «метод турбулентной ковариации», «техника вихревой ковариации».

¹³ Этот метод обладает рядом преимуществ в исследованиях потоков углерода как в текущее время, так и при изучении реакции экосистем на изменения окружающей среды. Особенно важно использование этой методики для экосистем, в которых определение текущих NPP и NEP проблематично. К таким экосистемам относятся, прежде всего, болота, спелые и перестойные леса [Выгодская с соавт., 2003]. Дело в том, что камерные методы измерений эмиссии и стока парниковых газов обеспечивают получение информации об этих процессах для микроландшафтов, особенности структуры и гидрологических условий которых приводят к различию потоков достигающих двух порядков. Поэтому требуется развитие методов, позволяющих оценивать эмиссию крупномасштабных заболоченных почвенных массивов [Зинченко с соавт., 2007].

- СКа метод – статический камерный метод (измерения удельных потоков газа на границе почва/атмосфера).
- СМ – «стандартная модель» эмиссии CH_4 из болотных ландшафтов Западной Сибири («стандартная модель» представляет собой удобную форму обобщения обширной экспериментальной информации; о ее концепции см., например, [Глаголев, 2008]).
- СреЗ – среднее значение (обычно авторы оригинальных публикаций используют просто словосочетание «среднее значение», не уточняя, о каком конкретно среднем – арифметическом среднем, арифметическом средневзвешенном, геометрическом среднем и т.п. – идет речь; чаще всего это оказывается простое среднее арифметическое).
- УБВ – уровень болотных вод. Вообще многие авторы говорят не о «болотных», а о «грунтовых» водах, но не приводят доказательств, что это были именно грунтовые воды. В таких случаях мы заменяли понятие «уровень грунтовых вод» на УБВ. Действительно, если воды были на самом деле грунтовыми, то в случае с болотом они являются также и «болотными», поэтому их уровень все равно можно характеризовать величиной УБВ (т.е. в этом случае правильны оба термина); если же они грунтовыми не были, то в случае с болотом они все равно остаются «болотными», следовательно правилен только термин «УБВ». Итак, мы видим, что в случае с болотом термин УБВ правилен всегда, независимо от природы вод.
- УП – удельный поток. Измеряется в единицах массы газа, выходящего с единицы поверхности почвы за единицу времени, т.е. например, в $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$; иногда для определенности прямо в единицах измерения указывают – о каком газе идет речь, например, $\text{мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$ (таким образом, если, например, приводятся данные по эмиссии метана, то записи единиц измерения $[\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}]$ и $[\text{мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}]$ будут аналогичны). Часто если речь идет об углерод-содержащих газах, то массу газа пересчитывают на массу углерода, т.е. вместо вышеуказанных единиц измерения используют $\text{мг}\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$, например, для метана $(12/16)\cdot[\text{мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}] = [\text{мг}\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}]$. Различные авторы приводят УП за разные единицы времени (чаще всего – либо за час, либо за сутки). Мы старались использовать в качестве единицы времени только часы, для чего иногда приходилось пересчитывать исходные величины авторов. Надо сказать, что почти всегда в экологии вместо правильного физического термина «удельный поток» авторы оригинальных публикаций неправильно говорят просто о «потоке» (с точки зрения физики, потоком массы называют массу, переносимую в единицу времени сквозь заданную поверхность [Филиппов, 1986, с. 6], а не через единицу поверхности; таким образом, единицами измерения потока газа будут $\text{мг}\cdot\text{час}^{-1}$). В связи с этим, везде, где ошибка авторов была очевидна (например, из размерности), мы заменяли «поток» оригинальной работы на «УП». Синонимом понятия «удельный поток» является изредка применяемое в экологической литературе понятие «поверхностная плотность потока».
- ХМАО – Ханты-Мансийский Автономный Округ.
- ЯНАО – Ямало-Ненецкий Автономный Округ.
- ЕС – электропроводность (ЕС – electrical conductivity).
- STD – стандартное отклонение.

АННОТАЦИИ

[*Анциферова и Столповский, 2007*]. Предпринята попытка сравнительной оценки интенсивности дыхания почв (по эмиссии CO_2) самой западной части Калининградской области – Земландского полуострова. Исследования проводились в полевых условиях методом Штатнова с середины июня до середины июля 2006 г. Изучались почвы на ключевых участках как в лесных массивах, так и на сельскохозяйственных угодьях (пашни, залежи). Климат западной части Калининградской области отличается сильным влиянием Балтийского моря, в связи с чем период биологической активности почв (безморозный) может продолжаться до 11 месяцев в году. Изучение, среди прочих, интенсивности дыхания осушенных болотных почв выявило широкий разброс значений эмиссии CO_2 в пределах одного поля на залежи. Авторы предположили, что это указывает на различную скорость минерализации торфа. Так, при УБВ в среднем 90 см на осушенной перегнойно-торфянисто-глеевой почве под камышово-вейниково-ситниковым сообществом эмиссия CO_2 составила в среднем $1.2 \text{ гC}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$, а на аналогичной почве при УГВ 100-110 см под пырейным сообществом – до $3.1 \text{ гC}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$.

[*Ваганов с соавт., 2005*]. Изложены результаты измерений и расчета параметров углеродного бюджета лесов и болот Сибири. Дана характеристика зональной изменчивости запасов (и прироста запасов) углерода в лесных и болотных экосистемах, приведены результаты прямых измерений потоков диоксида углерода методом микровихревых пульсаций, дана оценка неопределенности, вносимой в расчет параметров углеродного бюджета лесными пожарами.

[*Вагнер с соавт., 2000*]. Исследования на Самойлове, характерном для дельты Лены острове (72° с.ш., 126° в.д.), включали полевые измерения эмиссии CO_2 , а также продукции, окисления и эмиссии CH_4 в

типичной тундре. Результаты изучения продукции CH_4 *in situ* показали, что продукция шла на дне активного слоя при температуре 0.6 и 1.2 °С. Продукция метана в вертикальных профилях *in situ* при соответствующей температуре почвы в центре полигона составляла 1.0 нмоль·час⁻¹·г⁻¹ на дне слоя. Наивысшая скорость продукции CH_4 была найдена в верхнем слое полигона и составляла 38.9 нмоль·час⁻¹·г⁻¹ при средней температуре 10 °С. Инкубация почвенного материала активного слоя указывала на значительную скорость продукции CH_4 даже при нулевой температуре (0.14 нмоль·час⁻¹·г⁻¹) и температуре -3°С (0.06 нмоль·час⁻¹·г⁻¹). На границе полигона наблюдалась активность окисления метана (0.2-0.9 нмоль·час⁻¹·г⁻¹) до глубины почвы 30 см. Окисление метана в центре полигона было возможно обнаружить лишь в верхних 5 см.

[Вомперский с соавт., 2000]. Исследования по учету и оценке сезонной динамики выделения CO_2 и CH_4 камерным методом с поверхности почвы в атмосферу в лесах разной увлажненности и на болотах различной трофности организованы и проводятся с 1993 года на Западнодвинском лесоболотном стационаре Института лесоведения РАН в Тверской области. Отбор проб воздуха из камер производится еженедельно в течение вегетационного периода, равного 184 суткам (май-октябрь) с фиксацией температуры почвы и воздуха, выпавших осадков, давления воздуха, уровня почвенно-грунтовых вод. Оказалось, что процесс выделения CO_2 с поверхности почв очень динамичен, по отдельным срокам сезона его интенсивность может не отличаться у болот разного генезиса. Однако, выявлена отчетливая связь интенсивности почвенного дыхания (куда входит и дыхание корней) с продуктивностью лесных биогеоценозов и развитием процессов заболачивания. Максимальная эмиссия CO_2 характерна для почв зонально наиболее продуктивных ельников-кисличников и составляет 730 гС·м⁻², затем следуют сосняки чернично-зеленомошный – 515 и лишайниково-зеленомошный – 450. Примерно в 1.5-2.0 раза меньшая эмиссия CO_2 (по многолетним данным) наблюдается с поверхности естественных торфяно-болотных почв черноольшаника крупнотравно-папоротниково-грядово-мочажинного комплекса и сосняка кустарничково-сфагнового (390, 320 и 520 гС·м⁻², соответственно), что говорит о значительной аккумуляции углерода в торфе и замедленной деструкции годовичного опада и продукции напочвенного покрова. Гидролесомелиорация, понижая уровень почвенно-грунтовых вод и увеличивая зону аэрации, создает условия для возрастания эмиссии CO_2 в осушенных грядово-мочажинном комплексе и черноольшанике крапивном до 590 и 1290 гС·м⁻², соответственно. Наблюдения за эмиссией CH_4 из естественных болот резко различных по трофности среды показывают, что выделение CH_4 из болотных черноольховых топей на порядок более низкое (0.4-0.6 гС·м⁻² за 184 суток), чем из олиготрофного грядово-мочажинного болота (3.6-4.6 гС·м⁻²).

[Вомперский с соавт., 2007]. Исследования проводились на Западнодвинском лесоболотном стационаре Института лесоведения РАН в Тверской области в течение двух лет (август 2004 г. - июль 2006 г.) в олиготрофных болотных микроландшафтах: грядово-мочажинном безлесном (пр. пл. 1) и сосняке кустарничково-пушицево-сфагновом (пр. пл. 2). На объектах исследования была выполнена нивелировка поверхности почвы по квадратам 2×2 м. Амплитуда высотных различий составила 28.0 ± 1.4 см (пр. пл. 1) и 22.8 ± 1.1 см (пр. пл. 2). Эмиссию CO_2 по элементам нанорельефа измеряли при помощи Li-6400, оснащенного штатной камерой для измерения потоков CO_2 из почвы. Круглогодичные наблюдения за эмиссией показали, что УП CO_2 из болотных почв имеет сезонную изменчивость с максимальными значениями в летний период и минимальными – в зимний и зависит от комплекса погодных и гидротермических условий. Сосняк продуцирует CO_2 в 2 раза больше, чем безлесное болото. Величина эмиссии CO_2 напрямую зависит от количества выпавших осадков (колебания УБВ) и температуры почвы. Нанорельеф имеет большое значение в пространственном распределении эмиссии CO_2 по площади. Интенсивность круговорота веществ высокая в микроповышениях и низкая в мочажинах олиготрофных болот, которые большую часть периода наблюдений залиты водой, а зимой промерзают, и лед становится препятствием для выхода CO_2 . Эмиссия растет в ряду микропонижения – ровная поверхность – микроповышения, что характерно для безлесного болота. В сосняке в сухие и теплые периоды года (август-октябрь 2005 г. и май-июль 2006 г.), когда УБВ резко понижается и почва лучше прогревается, наибольшие потоки CO_2 наблюдаются из микропонижений и ровных местоположений. Вклад холодного времени года в суммарную годовую эмиссию составляет 14% в безлесном болоте и 23% - в сосняке кустарничково-пушицево-сфагновом.

[Выгодская с соавт., 2003]. Исследования особенностей углеродного баланса бореальных экосистем южной Европейской тайги были выполнены на основе анализа данных измерений МиВП. Непрерывные высокочастотные круглогодичные наблюдения потоков CO_2 были начаты в 1998 г. на территории Центрально-Лесного Государственного биосферного природного заповедника (Тверская область, 56° с.ш., 33° в.д.) на двух тестовых участках (еловый лес и верховое болото) в рамках проекта «EuroSiberian Carbonflux» (1998-2000 гг.). В дальнейшем наблюдения продолжались как часть проекта «TCOS-Siberia» в двух типах лесных экосистем (неморальный и бореальный ельники). Измерения, обработка и анализ качества данных выполнялись с использованием унифицированных подходов, принятых для сети станций

долговременного мониторинга потоков CO₂ (EUROFLUX), что обеспечивало сопоставимость и валидность полученных данных. Пульсационные измерения на ограниченных временных интервалах дополнялись измерениями дыхания почвы, листьев, стволов, велись наблюдения за скоростью разложения органического материала, проводилась оценка NPP. Кроме того, для исследуемой территории выполнялось описание структуры растительного покрова и почвы (эти работы проводились под руководством проф. Ю.Г. Пузаченко). В результате измерений установлена, в частности, значительная сезонная и межгодовая изменчивость потоков CO₂ для верхового болота (см. также [Arnet et al., 2002] ниже). Знак и значения потока CO₂ между поверхностью болота и атмосферой зависят от условий увлажнения в течение вегетационного периода. При отрицательным водном балансе верховое болото становится источником CO₂ для атмосферы.

[Гальченко с соавт., 2001]. Близ газового месторождения в районе г. Тарко-Сале (Западная Сибирь) в верхних горизонтах тундровых, таежных и болотных почв, а также в осадках озер изучались биогеохимические процессы образования и окисления CH₄. В болотах и донных осадках озер концентрации метана были выше 11 мкл/см³. Предшественником новообразуемого метана был, в основном, ацетат. Скорость ацетокластического метаногенеза достигала 2.2917 мгС·м⁻³·час⁻¹, тогда как скорость автотрофного метаногенеза была на порядок меньше. Наиболее активное образование и окисление метана наблюдалось в болотах и осадках озер. В газе, диффундирующем из болот и донных отложений озер, δ¹³С-CH₄ варьировало от -78 до -47‰, тогда как δ¹³С-CO₂ – от -18 до -1‰. В этих экосистемах эмиссия метана колебалась от 0.125 до 8.5833 мгCH₄·м⁻²·час⁻¹. Почвы тундры и тайги (как сухие, так и насыщенные водой), напротив, поглощали атмосферный метан со скоростью от 0.0125 до 0.2208 мгCH₄·м⁻²·час⁻¹. Поглощение метана почвами имело биологическую природу, что подтверждалось методами радиоактивной метки и стабильных изотопов (обнаружено изменение δ¹³С-CH₄ от величины -51% у исходного метана до -41% – у окисленного).

[Глаголев, 1999]. Целью работы была доработка и проверка модели эмиссии CH₄ на основании двух наборов экспериментальных данных, не использовавшихся ранее при создании модели. Полевые исследования проводились в июле-августе 1995-1998 гг. в районе стационара «Плотниково» Института почвоведения и агрохимии СО РАН (поселок Плотниково Бакчарского р-на Томской обл.: 56°51' с.ш., 82°53' в.д.) на Бакчарском болоте. Расчеты по модели для эмиссии метана из Бакчарского болота находились в хорошем соответствии с экспериментальными данными во временном масштабе нескольких лет (измеренный с погрешностью 20% средний поток метана варьировал от 4 до 19 г·м⁻²·сезон в зависимости от температуры, уровня грунтовых вод и типа растительной ассоциации, а рассчитанный по модели – от 3 до 14 г·м⁻²·сезон).

[Глаголев, 2010, с. 100-105]. В учебном пособии теоретически описаны процессы образования, потребления, переноса и эмиссии из болот метана и CO₂. Но в разд. 6.17 приведено множество конкретных экспериментальных данных по эмиссии CH₄ и CO₂ на территории России.

[Глаголев и Клепцова, 2007]. В работе представлены усредненные экспериментальные данные измерений эмиссии метана, температуры и уровня стояния воды на Бакчарском болоте (Бакчарский район Томской области) за 1995-2006 гг. Период усреднения колебался от 5 до 80 суток.

[Глаголев и Клепцова, 2009] – см. [Клепцова с соавт., 2008] ниже.

[Глаголев и Максюттов, 2009]. Приведены статистические характеристики (медианы, 1-ые и 3-и квартили) экспериментально измеренных распределений эмиссии CH₄ в типичных болотных ландшафтах природных зон Западной Сибири.

[Глаголев и Смагин, 2003]. Максимальная метаногенная активность в полевых условиях была выявлена на глубине 20-25 см под уровнем стояния воды и составила 1-2 гС·м⁻³·сут⁻¹. Образующийся здесь метан выносится из почвы тремя различными путями: (1) диффузией, вклад которой в транспорт метана составляет от менее чем 1% в насыщенных водой болотных почвах до 10% - в ненасыщенных; (2) направленным пузырьковым переносом от менее чем 1% при относительно низких температурах до 30% - при высоких; (3) транспортом, связанным с растениями, в зависимости от сезона - порядка 40-60% с возрастанием к концу лета. В процессе переноса к поверхности почвы происходит потребление метанотрофными микроорганизмами значительной доли CH₄, которая может составлять от 15-45% под *Equisetum fluviatile* или *Carex rostrata* до 55-80% под *Menyanthes trifoliata* или *Eriophorum vaginatum*, причем на глубине 70 см уже оказывается окислено 15-20% CH₄, приходящего с глубины 120 см. Взаимодействие различных механизмов образования, переноса, окисления метана и их зависимость от многочисленных факторов внешней среды приводит к сложной динамике потока во времени, напоминающей стохастический процесс. Однако в некоторых масштабах времени можно выделить четкие тренды. В частности, в масштабе порядка месяцев выявляется закономерная динамика потока (F, мгС·м⁻²·час⁻¹), определяемая температурой (T, °С) и уровнем стояния воды (W, см) в соответствии с уравнением $F = \exp(-1.478 + 0.126 \cdot T - 0.057 \cdot W)$, R² = 0.91 (W отсчитывается от поверхности почвы вдоль оси направленной вниз, таким образом стоянию воды над поверхностью соответствуют отрицательные W). Это же уравнение удовлетворительно описывает

различия потока в пространстве, причем в региональном масштабе на передний план выходит уровень стояния воды, поскольку в пределах одной области в данный момент времени температура может различаться не так значительно, как уровень стояния воды.

[Глаголев и Смагин, 2005, с. 170-172]. Монография посвящена описанию конкретных функций MATLAB-тулбокса NAG. Но в качестве численных примеров при описании функции $g02saf$ рассчитываются потоки метана и CO_2 из почвы кустарничковой тундры близ Воркуты (всего приведено 22 значения удельных потоков).

[Глаголев и Смагин, 2006]. Исследуется проблема экспериментальной оценки и моделирования экологической газовой функции болотных ландшафтов на различных иерархических уровнях их организации на примере эмиссии парникового газа – метана. Приведены результаты многолетних исследований генерирования, окисления, транспорта и эмиссии CH_4 на болотных массивах Томской области. Впервые обоснована региональная оценка потока метана из болот Томской области в атмосферу порядка $0.5 \text{ TgC-CH}_4/\text{год}$. Обсуждаются методологические проблемы исследования газовой функции в болотных экосистемах и почвах.

[Глаголев и Суворов, 2007; Глаголев с соавт., 2007]. Приводятся данные по эмиссии метана, полученные различными научными группами на территории ХМАО, в том числе собственные данные авторов. Показано, что влажные местообитания характеризуются большими скоростями эмиссии метана: мочажины ГМК, внутриболотные озерки и открытые топи – $1.3-3.9 \text{ мгC}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$, а менее влажные гряды ГМК и рямы – лишь $0.3-0.5 \text{ мгC}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$. Исключением является эмиссия из более глубоких и больших внутриболотных озер - она так же мала, как и из рямов и составляет около $0.3 \text{ мгC}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$. Кроме того, в первой работе подробно описаны современные методы измерения эмиссии газов из почв.

[Глаголев и Шнырев, 2006]. В работе рассмотрен перспективный дистанционный метод определения потоков парниковых газов из болот в региональном и глобальном масштабе, основанный на анализе космических снимков. Проанализированы преимущества данного метода. Рассмотрен конкретный пример определения потока CH_4 из естественных и осушенных болот юга Томской области.

[Глаголев и Шнырев, 2007]. В летне-осенние периоды 2003-2005 гг. в Бакчарском и Шегарском районах Томской области проводились измерения эмиссии метана на 57 объектах, относящихся к болотам различных типов. Какая-либо явно выраженная регулярная единообразная внутрисуточная динамика потока CH_4 не была обнаружена. Динамика потока в сезонном масштабе времени хорошо коррелирует ($R=0.82$) с разностью температур почвы на глубинах 5 и 15 см. Типы болот упорядочиваются по убыванию интенсивности эмиссии CH_4 в виде следующего ряда: низинные > переходные > верховые.

[Глаголев и Шнырев, 2008]. В летне-осенний период 2006 г. обследованы болотные массивы Томской области, расположенные в подзонах южной и средней тайги. Для различных типов местообитаний были получены следующие медианы УП CH_4 ($\text{мгC}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$): 0.67 в сосново-кустарничково-сфагновых сообществах; 4.06 и 2.67, соответственно, в понижениях и повышениях на открытой (безлесной) части болота; 0.74 на грядах и 2.13 в мочажинах грядово-мочажинных комплексов. По результатам исследований, а так же по литературным данным о степени заболоченности произведена оценка эмиссии метана (за период активной эмиссии) болотами Томской области; она составляет около $0.50\cdot 10^6 \text{ тC}$ т.е. 0.3-1.0% от эмиссии из болот всего мира или 0.1% от глобальной эмиссии CH_4 из всех источников.

[Глаголев и Эгнаташвили, 2004]. В работе описан вклад учебно-научных экспедиций 1997-2001 гг. отдела экологического образования Московского Городского Дворца Детского (Юношеского) Творчества в исследование эмиссии метана на Бакчарском болоте (Бакчарский район Томской области).

[Глаголев с соавт., 1999]. В работе рассматривается эксперимент, позволяющий оценить интенсивность переноса CH_4 через растения. Работы проводились в июле 1998 года на Бакчарском болоте (Томская область, $56^{\circ}51'$ с.ш., $82^{\circ}53'$ в.д.) в районе почвенного стационара “Плотниково” Института Почвоведения и Агрохимии СО РАН. Это верховое сфагновое болото является частью Большого Васюганского болота, расположенного в Западно-Сибирской низменности. В большинстве опытов с высокой надежностью было показано различие потоков метана в опыте (где присутствовали сосудистые растения) и контроле (где сосудистые растения отсутствовали), а также различие потоков метана в условиях затенения и при естественном режиме освещения.

[Глаголев с соавт., 2000]. В летние сезоны 1999-2000 гг. на территории Большого Васюганского болота (Западная Сибирь) были количественно измерены эмиссия и окисление метана, связанные с теми или иными растительными ассоциациями. До 60% эмиссии метана было связано с транспортом через растения. Окисление метана определялось с помощью анализа стабильных изотопов ($^{13}C/^{12}C$). Максимальное окисление и минимальная эмиссия соответствовали растительным ассоциациям со значительной долей *Eriophorum vaginatum* и *Menyanthes trifoliata*, а обратная ситуация (максимальная эмиссия и минимальное окисление) наблюдались там, где преобладали *Carex rostrata* и *Equisetum fluviatile*. В зависимости от типа растительной ассоциации могло окисляться до 80% образующегося метана, причем не только на

поверхности, но и на глубинах 20-50 см. Почвенно-физические исследования выявили наличие в толще торфа слоев с высоким содержанием газовой фазы (до 20% по объему) на тех глубинах, которые обычно относились к «метаногенному горизонту». Хроматографический анализ обнаружил наличие кислорода в этих слоях. Т.к. данные слои содержат значительное количество живых корней, то присутствие кислорода объяснено потоком из корней. Образование метана в этих слоях объяснено микрозональностью почвы. Лабораторные эксперименты показали наличие активных метаногенов и метанотрофов в этих слоях: одна и та же проба почвы активно окисляла метан в аэробных условиях и образовывала его в анаэробных.

[Глаголев с соавт., 2001]. В работе кратко описаны полевые измерения, выполнявшиеся в течение летнего сезона 2000 г. в Бакчарском районе Томской области на водораздельных болотных системах: (1) «Бакчарском болоте» (растительное сообщество *Carex-Equisetum-Sphagnum*) и олиготрофных ландшафтах бассейна р. Ключ в четырех точках катены – (2) высокий рям, (3) низкий рям, (4) рям на окрайке верхового болота, (5) открытая осоково-сфагновая топь. Максимальный УП соответствует высокому уровню стояния воды, минимальный – низкому. От 40% метана (при доминировании *Equisetum fluviatile* или *Carex rostrata*) до 70% (при доминировании *Menyanthes trifoliata* или *Eriophorum vaginatum*) окислялось в толще Бакчарского болота, не выходя на поверхность. При движении с глубины 120 см до 70 см окислялось 15-20% CH_4 (при доминировании *Menyanthes trifoliata*).

[Глаголев с соавт., 2003]. В районе южной оконечности Большого Васюганского болота близ пос. Плотниково (Бакчарский р-н Томской обл., $56^\circ 51'$ с.ш., $82^\circ 53'$ в.д.) в июле-августе 2002 г. установлено закономерное изменение потока метана из почвы в течение суток. Измерения проводились на двух участках болота, один из которых был преимущественно покрыт хвощом (*Equisetum fluviatile*), а другой – пушицей (*Eriophorum vaginatum*). В основных суточных экспериментах потоки измерялись в среднем примерно 1 раз за час. Во всех этих экспериментах (независимо от того, на какой площадке проводились измерения) было обнаружено, что ночью поток значимо выше (в среднем на 38%), чем днем (за “ночь” условно принимался промежуток времени от 23:00 до 7:00). Интересно отметить, что для среднего потока (т.е. для полусуммы потоков с вышеуказанных двух площадок) данное превышение закономерно возрастало с течением времени: 29% 29-30.07, 33% 2-3.08, 42% 12-13.08 и 47% 17-18.08, т.е. приблизительно на 1% в сутки. Для объяснения этого явления сформулированы две гипотезы.

[Глаголев с соавт., 2003а; Смагин с соавт., 2003]. Работы посвящены описанию возможности ограниченного применения в научных исследованиях по проблематике парниковых газов промышленного газоанализатора ПГА-7. В качестве примеров приведены конкретные величины УП метана на Бакчарском болоте (Бакчарский район Томской области), измеренных в 2002 г. при помощи указанного прибора.

[Глаголев с соавт., 2004; Глаголев с соавт., 2005]. Измерения проводились в течение летних сезонов 2003 и 2004 гг. в Бакчарском и Шегарском районах Томской области на более чем 70 объектах: открытых (в т.ч. топяных) и облесенных участках верховых, переходных и низинных (в т.ч. пойменных) естественных болот; гарях разного возраста; торфяниках, осушенных для нужд сельского хозяйства (в настоящее время с посевами зерновых культур и залежи); бывших торфоразработках (участках, впоследствии не использовавшихся и занятых сейчас травянистой растительностью и молодыми лесами, используемых под лесные культуры, а также как пастбища и сенокосы). На ряде объектов были проведены наблюдения за суточным ходом потоков газов, на участке Бакчарского болота наблюдения велись постоянно. Параллельно с эмиссией измерялись также суммарная, рассеянная и отраженная солнечная радиация, температура почвы от поверхности до глубины 50 см, уровень болотных вод. На всех точках наблюдений были сделаны геоботанические описания. Эмиссия CO_2 (без учета фотосинтеза) изменялась в диапазоне ≈ 20 -1000 $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$. Для естественных болот (вне зависимости от их трофности) преобладали значения $< 200 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ с минимумом на участках с высоким уровнем болотных вод (мочажины, топи) – 20-70 $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$. Для осушенных болот преобладали значения $> 200 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$: под рудеральными и луговыми сообществами выделялось 80-960, на пашне под зерновыми культурами 170-460, на участках лесосушения 100-560 $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$. Меньшая эмиссия CO_2 (50-270 $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$) наблюдалась со дна осушительных канав. Однако было много случаев отклонения от этой не очень выраженной тенденции: поток $< 100 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ мог наблюдаться на осушенных болотах, а эмиссия с естественных участков могла превышать 200 $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$. Поток CH_4 варьировал в диапазоне ≈ 0 -105 $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$. Более высокие значения были характерны для естественных болот (обычно 5-10 $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ и выше), особенно низинных, где эмиссия составляла 9-105 $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$. Для отдельных участков отмечалось поглощение метана почвой (обычно не более 0.10 $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$). Из-за большого количества осадков и высоких уровней болотных вод эмиссия метана в 2004 г. была выше, чем в 2003. Для всех объектов была отмечена значительная (нередко в разы) пространственная вариация потоков газов. Суточные наблюдения показали временные изменения эмиссии CO_2 в два и более раз. В большинстве случаев отмечалась тенденция ее увеличения в ночные часы, падение к утру и увеличение после полудня. В это же время наблюдались более высокие значения эмиссии метана. Для некоторых объектов отмечались смена эмиссии CH_4 его поглощением и наоборот.

[Глаголев с соавт., 2005] – см. [Глаголев с соавт., 2004] выше.

[Глаголев с соавт., 2007]. Основной вклад в парниковый эффект вносят CO_2 и CH_4 (соответственно 60% и 15-18%). Вклад бывшего СССР составляет в среднем 11% от глобального потока CH_4 . Однако к концу 80-х – началу 90-х гг. XX столетия на территории России почти не проводилось измерений потоков метана. В середине 90-х гг. в ряде работ представлена инвентаризация эмиссии CH_4 с территории России, однако эти работы ограничиваются информацией об измерениях по начало 90-х гг. В связи с этим в данной статье приводятся некоторые результаты измерения эмиссии метана и CO_2 с поверхности болотных экосистем на территории Западной Сибири в 90-е гг., так как основное количество измерений было выполнено именно в этот период.

[Глаголев с соавт., 2007a] – см. [Глаголев и Суворов, 2007] выше.

[Глаголев с соавт., 2008]. Оценено влияние осушения и освоения болот на эмиссию диоксида углерода и метана по данным измерений камерным методом, проведенных в летне-осенние периоды 2003-2005 гг. на юге Томской области. Исследования охватывали торфяники, осушенные для нужд сельского хозяйства (пашня и залежь), освоенные для добычи торфа (участки, не используемые в настоящее время и ранее рекультивированные под лесные культуры, сенокосы и пастбища), широкий спектр неосушенных верховых, переходных и низинных болот, гари разного возраста. Статистический анализ большого числа измерений свидетельствует о более значительной эмиссии CO_2 из используемых торфяников по сравнению с осушенными болотами. При этом часть осушенных объектов характеризуется эмиссией метана за счет потока из мелиоративных каналов.

[Глаголев с соавт., 2009]. Приведены характерные значения потока CH_4 в болотных ландшафтах северной тайги, лесотундры и тундры Западной Сибири. Они варьируют от $-0.03 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (для мерзлых бугров в тундре) до $4.81 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (для обводненных мочажин лесотундры и северной тайги). В работе установлено, что неопределенность регионального потока с территории Западной Сибири (обусловленная разбросом экспериментальных данных как за счет погрешностей измерения, так и за счет естественной вариабельности природных объектов) оказывается наибольшей для озер тундры, почти неизученных в плане эмиссии метана.

[Глаголев с соавт., 2009a]. Измерены удельные потоки метана, характерные для некоторых болотных ландшафтов лесостепной зоны Западной Сибири. В эвтрофных болотах лесостепи удельные потоки CH_4 очень близки к таковым в подтайге и распределение вероятности удельного потока метана имеет следующие параметры: 1-ая квартиль/медиана/3-я квартиль = $0.53/1.99/6.03 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Также близки и потоки из внутриболотных озер: как и в подтайге, это – десятки или первые сотни $\text{мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Распределение вероятности удельного потока в рядах: $0.00 / 0.09 / 0.21 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$.

[Глаголев с соавт., 2009б, в; 2010]. Приведены экспериментальные данные по эмиссии метана в типичных болотных микроландшафтах подтайги Западной Сибири. Эти данные генерализованы на основе концепции «стандартной модели», представляющей собой совокупность периодов эмиссий, картографической основы и распределений плотностей вероятностей величин потоков из типичных экосистем.

[Глаголев с соавт., 2010] – см. [Глаголев с соавт., 2009б] выше.

[Глаголев с соавт., 2010a, с. 81-89]. В учебном пособии описаны методы измерения эмиссии и поглощения газов почвами. Но в Приложении 1 в качестве примера приводятся экспериментальные данные измерения УП CO_2 , полученные на болоте «Чистое» близ Международного полевого стационара Центра динамики окружающей среды и глобального изменения климата Югорского государственного университета (пос. Шапша, ХМАО).

[Глаголев с соавт., 2010б]. Статья содержит историческую справку об исследованиях эмиссии метана и диоксида углерода болотами Западной Сибири за последние 20 лет. Приводятся сведения о работавших в этой области научных коллективах, задействованных исследовательских полигонах и используемых методиках. Особое внимание уделено проблеме пространственной и временной неоднородности потоков газов, связанной с суточной и сезонной динамикой, а также разнообразием типов болот. Рассматриваются и сопоставляются оценки потоков метана и CO_2 приводимые различными авторами, а также оценки аккумуляции углерода болотами Западной Сибири. Приведена наиболее хорошо обоснованная современная оценка эмиссии на основе «стандартной модели» C_7 : тундра – 0.16, лесотундра – 0.05, северная тайга – 0.21, средняя тайга – 0.69, южная тайга – 1.58, подтайга – 0.33, лесостепь – 0.16, степь – 0.02 $\text{MtCH}_4/\text{год}$.

[Глаголев с соавт., 2010в]. В статье приведены экспериментальные данные по удельным потокам метана с болотных ландшафтов тундры Западной Сибири в летний и зимний периоды. Рассмотрена возможность адсорбции метана снежным покровом.

[Глухова с соавт., 1999]. На Западновинском лесоболотном стационаре в Тверской области на постоянных пробных площадках, заложенных в ряде болотных и суходольных лесов, изучались компоненты углеродного цикла, такие как ежегодное поступление древесно-кустарникового опада, почвенные потоки:

CO₂, освобожденный из опада и отпада в аэробных условиях гетеротрофными организмами и CH₄ как результат анаэробного процесса. Процесс выделения CO₂ с поверхности почвы очень динамичен, по отдельным срокам сезона его интенсивность может не отличаться у болот разного генезиса. Однако, выявлена отчетливая связь интенсивности почвенного дыхания (куда входит и дыхание корней), прямая – с продуктивностью лесных биогеоценозов и обратная – с развитием процессов заболачивания. Максимальная эмиссия углерода (CO₂) характерна для зонально наиболее продуктивных ельников-кисличников (среднее значение по 1993, 1995-1997 гг. составляет 727 гС·м⁻² за период май-октябрь). Значения для других исследованных типов биогеоценозов за тот же период осреднения и в тех же единицах измерения: сосняк кустарничково-сфагновый – 522.73; сосняк чернично-зеленомошный мелкоотторфованный – 514.38; черноольшанник крупнотравно-папоротниковый – 386.36. За май-октябрь 1993 г. для сосняка лишайниково-зеленомошного и грядово-мочажинного комплекса с редкой внебонитетной сосной были получены, соответственно, суммарные значения 448.49 и 321.33 гС·м⁻². Эмиссия метана из болотных черноольховых топей оказалась на порядок более низкой (0.34-0.64, в среднем по 1993, 1995-1997 гг.: 0.43 гС·м⁻² за период май-октябрь), чем из ГМК (3.6-4.6, в среднем 4.01 гС·м⁻² за тот же период).

[Глухова с соавт., 2003]. Пожары, вызывающие кратковременные массовые выбросы углерода в атмосферу, сопровождаются, кроме того, слепожарными биогенными эмиссиями, которые (по оценкам специалистов) могут составлять до 70-85% всех эмиссий, возникающих при пожарах. В конце августа 1999 г. на объектах Западновинского лесоболотного стационара (Тверская обл.) Института лесоведения РАН возник антропогенный низовой пожар, охвативший около 30 га верховых сосновых осушенных торфяников. Низовые пожары вообще характеризуются неоднородностью выгорания как напочвенного покрова, так частично и торфа из-за естественной пестроты лесорастительных условий и, в частности – из-за специфики микрорельефа, создаваемого гидроресомелиорацией. Наличие гидромелиоративной сети, с одной стороны, является преградой для распространения огня, с другой – способствует возникновению очагов пожара, особенно на кавальерах и бровках осушительных каналов, где уровни почвенно-грунтовых вод ниже, чем в межканавных пространствах. После пожара идет процесс отмирания растений и их поврежденных огнем корней с активным разложением органического вещества, не компенсированного начавшимся восстановлением растительности. Хвоя (особенно в первый год после пожара) и кора, опадающие с отмирающих деревьев, при разложении вносят также свой вклад на протяжении ряда лет в эмиссию CO₂ с поверхности нарушенной огнем почвы. Слепожарная биогенная эмиссия диоксида углерода (через 2 недели после пожара) характеризовалась УП CO₂ почти вдвое превышающими таковые на участках, не пройденных пожаром (контроль). В то же время в центре межканавного пространства с частично выгоревшим напочвенным покровом и меньшим повреждением древостоя потери CO₂ (31.1 мгС·м⁻²·час⁻¹) были на уровне потерь в контроле (34.3 мгС·м⁻²·час⁻¹). В межканавье виден ярко выраженный парцеллярный эффект горения, более высокий УБВ, способствующий быстрому вымыванию продуктов пиролиза, и, по всей вероятности, отсутствующий стимулирующий эффект пожара на микромицетный комплекс торфяно-болотной почвы. На следующий после пожара 2000 год потоки CO₂ из почвы на бровках осушительных каналов (111.5 мгС·м⁻²·час⁻¹), где напочвенный покров выгорел полностью и не осталось ни одного живого дерева, превышали эмиссию на контрольных участках (80.7 мгС·м⁻²·час⁻¹) и были ниже в центре межканавного пространства (58.4 мгС·м⁻²·час⁻¹). В последующие 2001 и 2002 гг. потоки CO₂ из почвы сравнивались с контрольными или иногда были несколько большими опять же в местах нарушения напочвенного покрова и торфа, оставаясь ниже контрольных на площадках со слабо выгоревшим покровом.

[Головацкая и Дюкарев, 2007]. Работа выполнялась на северо-восточных отрогах Большого Васюганского болота на геофизическом стационаре ИМКЭС СО РАН «Васюганье», расположенном в междуречье рек Икса-Бакчар. Исследованный ландшафтный профиль включал высокий ям (п.1), низкий ям (п.2) и открытую осоково-сфагновую топь (п.3). Мощность торфяной залежи составляет от 1 до 3 м при возрасте от 3 до 5 тысяч лет. Измерения УП CO₂ с поверхности торфяных залежей проводились камерным методом с использованием инфракрасного газоанализатора ОПТОГАЗ 500.4. Сопровождающие метеорологические наблюдения выполнялись на базовом пункте (п.2) в соответствии с требованиями стандартных метеонаблюдений. Исследование эмиссии CO₂ на ландшафтном профиле показало ее зависимость от типов фитоценоза. Наблюдалось заметное снижение эмиссии CO₂ от окраины болотного массива к его центральной части, что связывается авторами с различными ландшафтными условиями. В отдельные годы УП CO₂ в разных фитоценозах могут различаться более чем в 2 раза. Анализ влияния гидрологических свойств торфяной залежи на интенсивность выделения CO₂ показал наличие корреляционной связи УП CO₂ с УБВ ($r^2 = 0.449$), а также с влажностью ($r^2 = 0.168$) и температурой торфяной залежи ($r^2 = 0.423$). Однако учитывая, что гидрологические условия определяются в основном погодными условиями, а температура поверхности торфяной залежи тесно связана с температурой воздуха ($r^2 = 0.689$), был проведен более подробный анализ влияния метеорологических параметров на суточную эмиссию CO₂. В среднем для всего периода исследования максимум выделения приходился на 19 часов, а

минимум на 7 часов, средняя амплитуда суточных колебаний УП CO_2 составляла $34 \text{ мгCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Наибольшие различия в суточном ходе по месяцам наблюдались в дневное время, тогда как в ночные и утренние часы значения эмиссии имели близкие величины. Анализ полученных данных показал наличие зависимости УП CO_2 от температуры воздуха ($r = 0.59$). Корреляционная связь УП CO_2 проявлялась и с другими характеристиками, например с влажностью воздуха ($r = -0.40$), атмосферным давлением ($r = -0.53$) и др., хотя оказалась менее значимой. Таким образом, в результате проведенного исследования выявлено, что эмиссия CO_2 имеет четко выраженный суточный и сезонный ход и определяется погодными условиями (температурой и влажностью воздуха, атмосферным давлением, а также температурой деятельного слоя торфяной залежи).

[Десятков с соавт., 1997]. Рассматривается метод оценки потока с подстилающей поверхности путем решения обратной задачи распространения в пограничном слое атмосферы. Метод основан на применении сопряженного уравнения турбулентной диффузии и оригинальной модели распространения в пограничном слое атмосферы. Рассматриваются практические примеры; в частности, в качестве исходных данных использованы результаты измерения концентрации метана над Бакчарским болотом, на основании которых восстанавливаются удельные потоки эмиссии метана. Вычисленные величины эмиссии сравниваются с литературными данными о потоках, измеренных камерным методом.

[Елсаков и Хейкинен, 2000]. В бассейне р. Лег-Воркута ($67^\circ 23'$ с.ш. $63^\circ 22'$ в.д.) в 60 км на юго-запад от г. Воркута были заложены 22 ИП, которые имели градиенты уровней поверхностных вод и глубины оттаивания активного слоя. Из них в состав осоково-мохового сообщества входили 3 ИП, пушицево-мохового – 5 ИП и мохового – 13. В течение вегетационного периода 1999 г. проводились ежедневные измерения газообмена CO_2 с использованием инфракрасного газоанализатора LiCor-6200 (Nebraska, USA) СКа методом (средний объем камеры – 0.104 м^3). На основании газометрических измерений (NEE , R_{eco}^{14}) и статистических отношений между параметрами газообмена CO_2 и микроклиматическими данными проводилась оценка первичной продукции (NEP) выделенных групп сообществ за вегетационный период. Параллельно представленным измерениям учитывалась динамика наземной биомассы сосудистых растений и мхов на выделенных площадках. Содержание углерода в собранном растительном материале определяли на автоматическом анализаторе элементного состава EA 1110. На основании полученных данных рассчитывали объем и распределение аккумулированного углерода в наземной биомассе растений выделенных сообществ за вегетационный период. Суммарные значения NEP за вегетационный период 1999 г. уменьшались в следующем ряду сообществ: моховое ($170.3 \pm 9.1 \text{ гC/м}^2$), пушицево-моховое ($108.9 \pm 10.8 \text{ гC/м}^2$) и осоково-моховое ($73.3 \pm 6.8 \text{ гC/м}^2$).

[Замолодчиков с соавт., 2000]. Проявления глобального потепления наиболее заметны в высоких широтах. Связанные с ними изменения углеродных параметров тундровых экосистем могут быть зарегистрированы уже в настоящее время. Измерения потоков диоксида углерода, проведенные в окрестностях г. Воркуты, показали, что в бесснежный период 1999 г. экосистемы южных тундр были заметным источником углерода для атмосферы. За июнь – сентябрь кустарниково-кустарничковая тундра потеряла 70 ± 16 , а осоковое болото – $21 \pm 13 \text{ гC} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сезон}^{-1}$. За аналогичный период 1996 г. кустарниково-кустарничковая тундра выделила в атмосферу в 3.5 раза меньше углерода ($21 \pm 17 \text{ гC} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сезон}^{-1}$), в то время как осоковое болото поглотило из атмосферы $54 \pm 22 \text{ гC} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сезон}^{-1}$. Уровни валового дыхания исследованных экосистем значимо не различались между 1996 и 1999 гг. ($P = 0.16 \div 17$), в то время как валовая первичная продукция была значимо ниже ($P = 0.03 \div 0.04$) в 1999 г. Следовательно, отмеченные изменения углеродного баланса в первую очередь связаны с сокращением первичной продукции. Среднесезонные температуры и прочие погодные параметры были практически одинаковы в 1996 и 1999 гг. ($P = 0.6$). Главное различие между годами заключалось в изменчивости температурных условий. Например, в июле 1996 г. среднесуточные температуры варьировали от 11 до 17°C , в то время как в июле 1999 г. – от 2 до 20°C . Межгодовые различия дисперсий июльских температур статистически значимы ($P = 0.07$). Резко и постоянно варьирующие температуры воздуха привели к стрессам ассимилирующих органов тундровой растительности и последующему снижению валовой первичной продукции. Вместе с эмиссией CO_2 за снежный период современный уровень годовых потерь углерода южными тундрами Европейской части России составил $60\text{-}100 \text{ гC} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$.

[Замолодчиков с соавт., 2003]. Стационарные исследования в дальневосточных тундрах были инициированы в 2000 г. Объектом исследования служила типичная дальневосточная тундра в 4 км к северо-западу от пос. Лаврентия. Программа измерений включала регистрацию широкого комплекса экологических параметров, а именно микрометеорологические измерения NEP и баланса энергии, характеристику сезонного хода оттаивания и влажности активного слоя почвы, мониторинг различных

¹⁴ Мы заменили используемое здесь авторами обозначение R_{TOT} (которое в своей работе они не поясняют), посчитав, что это – валовое дыхание.

метеорологических характеристик, наблюдения за фенологией и развитием растительности. Погодные условия 2000 г. были близки к среднемноголетним, и потому функционирование тундры в этом году может рассматриваться как эталонное для второй половины XX-го в., а 2002 г. обладал ярко выраженными климатическими аномалиями. Для него было характерно раннее снеготаяние, крайне малое количество осадков, значительное количество солнечных дней, преобладание ветров южного направления. В 2002 г. среднелетняя температура воздуха была более чем в 1.5 раза выше по сравнению с 2000 г. Малое количество осадков привело к снижению уровня грунтовых вод (в 3 раза далее от поверхности по сравнению с 2000 г.). Влажность верхних слоев почвы уменьшилась в 2002 г. в 1.2 раза. Глубина сезонного оттаивания почвы увеличилась незначительно (в 1.1 раза). Условия 2002 г. авторы характеризуют как благоприятные для усиления деструкционной активности в почве. Среднесезонное значение R_{eco} в 2002 г. в 1.5 раза превосходило уровень 2000 г. Однако уровень GPP увеличился в 1.8 раза, в результате типичная дальневосточная тундра увеличила средний за вегетационный сезон уровень поглощения CO_2 из атмосферы более чем в 4 раза. В условиях Чукотского п-ова локальная климатическая аномалия 2002 г. привела к опережающему росту первичной продукции по сравнению с деструкцией и увеличению стока углерода из атмосферы. Это свидетельствует о наличии отрицательной обратной связи в системе климат – углеродный баланс для данного региона Арктики, что существенно для прогнозов развития глобального потепления.

[Зинченко с соавт., 2007]. Предлагается метод, использующий условия накопления газа в вегетационный период в ночное время в условиях инверсии температуры в нижней части пограничного слоя атмосферы. Метод применим для определения интенсивности потока метана от территорий площадью порядка 10^3 км^2 . Метод реализован для измерений вертикальных профилей концентрации метана на башне в процессе его ночного накопления в слое до 60 м. Он применялся для измерения эмиссии с заболоченных территорий северной части Западно-Сибирской низменности.

[Икконен и Сидорова, 2000]. В целях оценки динамики эмиссии диоксида углерода из торфяной залежи в работе использованы два вида математического моделирования: статистическое (регрессионное) и динамическое моделирование диффузионного массопереноса газа. Объектом исследования являлось мезоолиготрофное болото в естественном и осушенном состоянии. Расчеты динамики потока газа основаны на натуральных наблюдениях эмиссии CO_2 из торфяной почвы (СКА методом), градиента концентрации газа в почвенном воздухе, погодных условий, температурного и влажностного режимов торфяной залежи, физических характеристик торфа. В случае статистического моделирования выбрана модель в виде уравнения множественной регрессии с двумя независимыми переменными: температурой воздуха у поверхности мохового покрова и уровнем грунтовых вод, однако на основе данных полевых исследований не выявлена температурная зависимость процесса продуцирования CO_2 . Согласно расчетам по предложенной модели средние за теплый период значения удельных потоков из залежи составили 0.75 и $1.09 \text{ гС}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ для естественного и осушаемого болота соответственно. Расчеты диффузионного потока CO_2 показали, что в неосушенном торфянике в период стояния грунтовых вод выше средневегетационного, вклад данного механизма массопереноса составляет 50% в эмиссию газа с поверхности. На осушенном торфянике диффузионные потоки CO_2 сопоставимы с экспериментально полученными значениями эмиссии газа. Кинетическое моделирование тепло-влажнопереноса и массопереноса газа выполнено на основе комплексной модели продукционного процесса Р.А. Полуэктова. Вычисленные по модели скорости диффузионного потока CO_2 оказались в 2-3 раза ниже натуральных значений эмиссии газа. Данные расхождения авторы относят к недостаточно точно оцененной функции генерирования («источник-сток») газа в корнеобитаемом слое торфяной залежи.

[Инишева и Головацкая, 2002]. Функции наземных экосистем в качестве источников или стоков углекислоты определяются балансом между двумя мощными биосферными процессами – фотосинтетической продукцией органического углерода и выделением CO_2 при дыхании и разложении органического вещества. Чистая первичная продукция олиготрофных болот составляет $210\text{-}600 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$, мезотрофных болот – $330\text{-}1000 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$, евтрофных – $720\text{-}3400 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$. В работе приводятся обширные литературные данные по выделению CO_2 и CH_4 болотами в широком географическом аспекте: Канада, Россия (Ленинградская, Тверская, Томская области, Западная Сибирь, Южное Васюганье), Финляндия, Швеция. Также приводятся и собственные экспериментальные данные авторов по эмиссии CO_2 на ландшафтном профиле р. Ключ (Бакчарское болото, Томская обл.).

[Казанцев и Глаголев, 2008]. В работе приводятся экспериментальные данные по эмиссии метана в северной тайге Западной Сибири, вошедшие в «стандартную модель» Аа3. Согласно СМ Аа3 1-ые квартили/медианы/3-и квартили УП CH_4 составляют ($\text{мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$): из мерзлых бугров (на плоско-бугристых болотах) $-0.062/0.008/0.015$; из рямов, гряд ГМК и ГМОК $-0.029/0.000/0.414$; из олиготрофных необводненных и обводненных мочажин, соответственно, $0.720/1.163/2.708$ и $2.730/3.698/5.027$; из мезотрофных болот $0.938/2.873/7.470$, из озер $0.139/1.395/2.738$. Вышеперечисленные значения считаются

относящимися не ко всему году, а лишь к «периоду эмиссии метана», продолжительность которого принимается равной 138 суток.

[Казанцев и Глаголев, 2010]. Приведены обобщенные результаты полевых исследований в летние сезоны 2007, 2008 и 2009 гг. на 12 площадках в разных типах болотных ландшафтов средней тайги Западной Сибири. Эмиссия CH_4 в **олиготрофных** болотах составила (приводятся в $\text{мгCH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ 1-ая квартиль/медиана/3-я квартиль): в мочажинах 2.34/3.69/4.94 (по данным 319 измерений), в рямах 0.00/0.03/0.18 (по данным 138 измерений), в грядах 0.01/0.16/0.46 (по данным 78 измерений), на приозерных сплавинах 4.72/7.08/8.37 (по данным 31 измерения), на внутриволотных озерах 0.30/1.50/2.86 (по данным 19 измерений); медиана УП с открытой топи («галыи») **мезотрофного** болота составила $1.98 \text{ мгCH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$.

[Калюжный с соавт., 2009]. Приведены результаты измерений эмиссии метана на олиготрофном болотном массиве Ламмин-Суо. Показано, что интенсивность ее зависит от транспорта метана в деятельном слое торфяной залежи. Наибольшая интенсивность эмиссии наблюдается в осоково-сфагновом микроландшафте, а также на мочажинах грядово-мочажинного комплекса. Установлено, что при понижении уровня болотных вод на 30-35 см от поверхности болота интенсивность потока метана приближается к нулю. Оценена пространственная изменчивость эмиссии CH_4 в пределах господствующих болотных микроландшафтов. Показано, что в микроландшафтах с ориентированным микрорельефом (грядово-мочажинный комплекс) она наибольшая – 207%, в центральной части болота (сфагново-кустарниково-пушицевый, облесенный сосной микроландшафт) наименьшая – 76%. Разработана модель эмиссии метана на болотных массивах. Модель проверена по данным наблюдений. Сравнение модельных расчетов с экспериментальными данными показывает их близость, что позволяет использовать модель при различных расчетах и оценках влияния природных факторов на интенсивность эмиссии CH_4 .

[Карелин и Замолотчиков, 2008]. На основе многолетних полевых исследований углеродного и других форм обмена на границе разделов «почва-растительность-приземный слой атмосферы» выявлены закономерности функционирования тундровых экосистем в основных зонах распространения многолетнемерзлых пород на территории Северной Евразии и Аляски. Проведен статистический анализ абиотических факторов и биоценологических признаков зональных криогенных экосистем. Показано, что обмен углерода может служить адекватной мерой вещественно-энергетического обмена криогенных экосистем в целом. Разработана система оценки потоков и баланса углерода на разных пространственно-временных масштабах.

[Клепцова и Глаголев, 2009]. На основе измеренных в течение летне-осенних периодов 2007-2008 гг. на территории ХМАО и ЯНАО потоков CH_4 вычисляются величины УП CH_4 , характерные для севера Западной Сибири. Кроме того, оценивается неопределенность регионального потока, порождаемая разбросом этих величин.

[Клепцова с соавт., 2008; Глаголев и Клепцова, 2009]. В работах приводятся экспериментальные данные по эмиссии метана в лесотундре Западной Сибири, вошедшие в «стандартные модели» Аа3 и Аа1, соответственно. Согласно более совершенной СМ Аа3 1-ые квартили/медианы/3-и квартили УП CH_4 составляют ($\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$): из мерзлых бугров (на плоско-бугристых болотах) 0.03/0.20/0.28, из олиготрофных необводненных мочажин 0.77/1.12/1.37, из обводненных мочажин 8.38/11.86/21.82, из мезотрофных болот 0.70/1.28/2.52, из озер 0.26/0.55/1.36. Вышеперечисленные значения считаются относящимися не ко всему году, а лишь к «периоду эмиссии метана», продолжительность которого принимается равной 120 суток.

[Клепцова с соавт., 2010]. В статье приводятся экспериментальные данные по потокам метана с рямов и гряд средней тайги Западной Сибири. Подавляющая часть этих измерений (214 из 220, т.е. 97.3%) получена на территории ХМАО. Данные объединяются в рамках «стандартной модели» Вc7, включающей в себя медианы распределений потоков метана с шести типов микроландшафтов, их площади в ячейках географической сетки $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ и продолжительность периода эмиссии метана для данной зоны.

[Клепцова с соавт., 2010a]. В статье представлены экспериментальные данные об эмиссии метана с эвтрофных болот южной тайги Западной Сибири (исследования проводились в течение летне-осенних сезонов 2003-2008 гг. на территории Томской и Тюменской областей). Получена регрессионная зависимость ($R^2 = 0.84$, $n = 17$), связывающая удельный поток CH_4 (F , $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) с температурами почвы на глубинах 5, 15 и 45 см (соответственно, T_5 , T_{15} , T_{45} , $^\circ\text{C}$): $F = 46.4 - 14.5 \cdot (T_{45} - T_{15}) - 3.3 \cdot T_5$.

[Косых, 2000]. В северной тайге¹⁵ Западной Сибири на плоскобугристых болотах, грядово-мочажинно-озерковых комплексах и на террасных мезотрофных болотах определен вход органического вещества с

¹⁵ В оригинальной работе написано «В северной подтайге...». Мы посчитали это очевидной ошибкой и исправили здесь «подтайгу» на «тайгу»: конкретные объекты, которые автор приводит в своей работе (и которые мы в данном кратком реферате опустили) находятся именно в северной тайге, например «Плоскобугристое болото, Тегу-Мамонтотай» находится близ г. Ноябрьск в северной тайге.

чистой первичной продукцией. Продукция бугров плоскобугристых болот с кустарничково-лишайниково-сфагновым растительным покровом изменяется от 220 до 300 гС/м² в год. Вокруг бугров располагаются олиготрофные лимозово-осоково-сфагновые мочажины с NPP = 215 гС/м² в год. На грядах грядово-мочажинно-озерковых комплексов NPP = 280 гС/м² в год. В мезотрофной пушицево-осоково-сфагнутой мочажине вход NPP увеличивается до 370 гС/м² в год. Мезотрофные болота с пушицево-осоково-сфагнутой ассоциацией формирует до 500 гС/м² в год. NPP на болотах изменяется от 150 до 500 гС/м² в год: на грядах и буграх от 200 до 300, в мочажинах от 150 до 550 гС/м² в год. На всех элементах нанорельефа наибольший вклад в продукцию вносит подземная масса корней и корневищ осок, пушиц, кустарников и кустарничков и составляет 40-50% от NPP. Продукция мхов и лишайников на грядах и буграх на 10-20% меньше, чем в мочажинах и меняется от 70 до 170 гС/м² в год. В олиготрофных мочажинах мхи вносят до 60% NPP, в мезотрофных – 40%, на грядах и буграх – 40% NPP. И только 10-20% NPP приходится на надземную продукцию кустарников, кустарничков, трав и осок.

[Косых с соавт., 2010; 2010a]. Дана количественная оценка поступления химических элементов с чистой первичной продукцией в болотные почвы средней тайги Западной Сибири, потери при разложении и возвращение химических элементов в процессе ретранслокации. Чистая первичная продукция болотных экосистем средней тайги составляет 330-560 гС/(м²·год) в зависимости от водно-минерального питания, климатических условий года и типа экосистемы. Максимальная продукция создается травами и мхами в мезотрофной мочажине. Скорость разложения составляет от 50 до 150 гС/(м²·год). В ряме, на гряде и в топи 27% углерода, потребленного всей экосистемой, после отмирания теряется в течение 1 года, оставшееся количество углерода остается в растительных остатках и переходит в торф, продолжая разлагаться в последующие годы. Ввиду низкой скорости разложения в мочажине за год теряется минимальное количество углерода – не более 15%, что соответствует 50 г/(м²·год).

[Левин с соавт., 2000]. Изучалась эмиссия CO₂ и CH₄, а также влияющих на нее факторов среды, в заболоченном лесу и на верховом болоте в Центрально-Лесном биосферном государственном природном заповеднике (56°30' с.ш., 32°30' в.д.) – типичных ВБУ моренных ландшафтов центра ЕТР. Измерения проводились на двух участках верхового болота (облесенном и открытом), а также на нескольких участках заболоченного леса (от ельника сфагнуто-черничного до сосняка осоково-пушицево-сфагнутого) камерным методом (экспозиция 1 час) с периодичностью 1-2 раза в месяц в течение всех сезонов 1998-1999 гг. Параллельно измерялся УБВ; мощность и плотность снега; температура воздуха, поверхности и профиля почвы. Для всех объектов определялась мощность торфяной залежи, pH и электропроводность (ЭП) болотных вод. Пробы воздуха анализировались методами газовой хроматографии. Исследования показали, что при глубине торфа более 80 см и, вне зависимости от глубины торфа, при УБВ выше -15 см закономерности эмиссии CO₂ и CH₄ с заболоченного леса были близки таковым с верхового болота. Совпадают значения корреляции с факторами среды (УБВ и температура), а также порядок минимальных и максимальных значений. На участках с глубиной торфа менее 80 см в периоды низкого стояния УБВ прослеживается отрицательная связь эмиссии CH₄ и CO₂, а также поглощение CH₄ в зимние и, в вечернее время, в осенние месяцы. В наибольшей степени эмиссия CH₄ определялась УБВ и температурами воздуха и почвы, влияние pH и ЭП оказалось незначительным.

[Минаева с соавт., 2003]. Исследования проводились на территории Центрально-Лесного заповедника (Тверская область, 56°26'-39' с.ш., 32°29'-33°01' в.д.). Газообмен CO₂ между поверхностью болота и атмосферой на уровне экосистемного осреднения исследовался с помощью метода МиВП, а на уровне микроландшафтов – СКа методом (с использованием прозрачных и непрозрачных камер). Полученные результаты характеризуются авторами как предварительные. Анализ результатов измерений включал проверку гипотезы о наличии зависимости интенсивности потоков CO₂ от состояния растительного покрова, микроклиматических показателей и уровня грунтовых вод. Влияние состояния растительного покрова определяется интенсивностью видимого фотосинтеза и рассматривалось отдельно для сфагнутого покрова, травяно-кустарничкового и древесного ярусов, а зависимость интенсивности фотосинтеза от температуры учитывалась как постоянный фактор (поскольку известно, что эта зависимость является приблизительно сходной для всех групп растений). Фитомасса ассимилирующей части сфагнутого покрова и древесного яруса (хвойные) оставалась практически стабильной в течение сезона, поэтому фактором, определяющим интенсивность фотосинтеза, являлся УБВ и связанная с ним относительная влажность верхнего слоя торфа. При этом для сфагнутого оптимальным УБВ было 15-20 см, а критическим – как периоды обводнения поверхности болота, так и УБВ ниже 50 см. Для древесного яруса нижний предел УБВ может достигать 80 см. Подобные закономерности выявляются при изучении корреляции УБВ и нетто-экосистемного обмена CO₂ методом МиВП. Знак и абсолютные значения потока варьировали в течение вегетационного сезона. Виды травяно-кустарничкового яруса значительно меняют ассимилирующую фитомассу в течение вегетационного сезона, чем и определяется их вклад в динамику потока CO₂. Кроме этого, имеет место пространственное варьирование показателей потока CO₂, связанное с типом доминирующей биоморфы в

зависимости от того, были ли это ксероморфные вечнозеленые виды и виды с ди- и полициклическими побегими (кустарнички, *Eriophorum vaginatum*, *Carex pauciflora*) или мезоморфные виды с моноциклическими побегими и аэренхематозными тканями (*Rhynchospora alba*, *Scheuchzeria palustris*, *Carex rostrata*). Существует корреляция между показателями проективного покрытия, морфометрическими характеристиками растений, продукцией травяно-кустарничкового яруса, фенофазами и данными измерений газообмена СКа методом.

[Молчанов, 2000]. Суточный баланс в заболоченном сосновом насаждении складывается из следующих статей (все величины приведены в $\text{гСО}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$): поглощение CO_2 днем 1.7; ночное дыхание хвои 0.1; дыхание стволов 0.6; дыхание корней 0.6; вынос CO_2 из почвы ночью 14.4.

[Наумов, 1999]. Для обследованных открытых сфагновых болот южной тайги (окрестности п. Плотниково, Томская обл.) годовая первичная продукция сфагнума составляла от 80 до $180 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Поток углерода в атмосферу в середине летнего сезона характеризовался величинами 1.6-3.6 $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Около 70% суммарного потока углерода в атмосферу приходится на темновое дыхание сфагновых мхов, трав и кустарничков. Эмиссия C-CH_4 в атмосферу не превышала 1/10 общего потока. Коэффициент участия метана в потоке С из торфяной толщи в атмосферу ($\text{C-CH}_4/\text{C-CO}_2$)_{soil} оценивался максимальным значением 0.3.

[Наумов, 2000]. Исследования проводились в подзоне северной тайги на нескольких типах болот в районе г. Ноябрьска ($63^\circ 30'$ с.ш., $75^\circ 30'$ в.д.), включавших грядово-мочажинный болотный комплекс, плоскобугристые болота и заболоченную прирусловую часть речной долины. Потоки CO_2 , CH_4 и СО измерялись камерным методом в 5-кратной повторности. Максимальная эмиссия CO_2 и метана наблюдалась в августе и составляла для разных объектов 80-190 $\text{мгСО}_2/(\text{час} \cdot \text{м}^2)$ и 0.6-1.7 $\text{мгCH}_4/(\text{час} \cdot \text{м}^2)$. Более высокие значения были получены для ГМК и долинного болота. Плоскобугристые болота отличались сравнительно низкими величинами потоков. К концу сентября в связи с понижением температуры воздуха и почвы выделение газов с поверхности болот резко снизилось в 2.5-3 раза. В исследованных экосистемах наблюдалось как выделение окиси углерода, так и ее поглощение. Смена направления потока СО проявлялась в суточном и сезонном ходе. Обычно выделение этого газа совпадало с максимальной эмиссией CO_2 .

[Наумов, 2002]. В работе рассматриваются обобщенные данные по эмиссии диоксида углерода и метана, полученные по единой методике при исследовании различных типов болотных экосистем в подзонах северной, средней и южной тайги. Получены средние оценки содержания CO_2 и CH_4 в приземном слое атмосферы и болотных водах. Обсуждается влияние природных экологических и техногенных факторов (условий) на их динамику и распределение в направлении широтно-зонального климатического градиента. Сделан вывод о значительной доле ископаемого CH_4 в атмосфере в условиях интенсивной эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири. Обсуждается роль северных болот в глобальном (планетарном) цикле окиси углерода. Вскрыты важные особенности и причины деградационных явлений в северных болотных провинциях, приводящие к возникновению так называемых «римпи».

[Наумов, 2003]. В докладе рассматриваются обобщенные данные по эмиссии CO_2 и CH_4 , полученные по единой методике при исследовании различных типов болотных экосистем в подзонах северной, средней, и южной тайги: соответственно, в районе населенных пунктов Ноябрьск ($63^\circ 10'$ с.ш., $75^\circ 30'$ в.д.), Нижневартовск ($60^\circ 56'$ с.ш., $76^\circ 50'$ в.д.) и Плотниково ($56^\circ 50'$ с.ш., $82^\circ 50'$ в.д.).

[Наумов с соавт., 2007]. Изучены компоненты и процессы углеродного цикла северных болот Западной Сибири. Рассмотрены особенности функционирования углеродного цикла болот в контрастных условиях средней тайги и лесотундры. Обсуждаются вопросы функционального состояния северных болот в связи с современным климатическим трендом.

[Новиков и Русаков, 2005]. Определено влияние осушительной мелиорации и продолжительного сельскохозяйственного использования на актуальную и потенциальную активность эмиссии диоксида углерода, метана и закиси азота в торфяных почвах Ростовской низины (Ярославская обл.). Изучены процессы поглощения метана и закиси азота. Проведена сравнительная оценка эмиссии парниковых газов в торфяных почвах разной степени освоения. Наибольшая эмиссия метана установлена в контрольной некультивируемой торфяной почве. Максимальная скорость минерализации, выраженная в эмиссии диоксида углерода, выявлена в агроторфяной почве (возраст освоения 30 лет). Максимальная активность денитрификации обнаружена в погребенной агроторфяной почве. Основным продуктом денитрификации во всех торфяных почвах – молекулярный азот.

[Новиков и Степанов, 2001]. В настоящем исследовании проводился анализ метанооксилюющей активности торфяной хорошо окультуренной почвы на травянодревесных торфах, образцы которой отбирались в пойме р. Яхромы (Дмитровский р-н Московской обл.). Исследовалось влияние хлористого аммония на активность окисления метана. Характер воздействия ионов аммония на активность

метанотрофных бактерий, осуществляющих окисление метана, можно охарактеризовать как конкурентное ингибирование. Благодаря сходству ферментов метанмонооксигеназы (у метанотрофов) и аммониймонооксигеназы (у нитрификаторов), метанотрофы способны окислять аммоний. Скорость окисления метана в исследованных образцах почв до внесения NH_4Cl составляла 87 ± 18 нмоль $\text{CH}_4 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$. Внесение NH_4Cl сопровождалось снижением скорости окисления CH_4 , ингибирующий эффект составил $24 \pm 4\%$. Подобный характер воздействия аммонийных соединений приводит к различным негативным последствиям, среди которых увеличение эмиссии метана из почв в атмосферу, увеличение скорости нитрификации и выноса из почв вносимых аммонийных удобрений.

[Новиков и Степанов, 2002]. Изучен характер воздействия ионов аммония на активность окисления метана в почвах (в т.ч. исследовалась торфяная хорошо окультуренная почва на травянодревесных торфах). Для разных типов почв европейской части России проведена оценка степени ингибирования метанотрофной активности в присутствии аммония в почвенном растворе. Проведена количественная оценка изменения метанотрофной активности почв в зависимости от свойств почв и концентрации аммония.

[Новиков и Степанов, 2003]. Определена полевая активность эмиссии CO_2 , CH_4 и закиси азота (N_2O) в освоенных и естественных торфяных почвах. Исследования проводились в пойме реки Яхромы (Дмитровский р-н Московской обл.) и на территории Ростовской низины (Ярославская обл.). Было изучено две пары (освоенная – неосвоенная) торфяных почв. На территории Яхромской поймы: 1 – агроторфяная типичная почва на травяно-гипновых торфах (80-85 лет освоения), 2 – торфяная типичная почва на гипновом разнотравном торфе (контроль). В Ростовской низине: 3 – агроторфяно-минеральная типичная почва на древесных торфах (30-35 лет освоения); 4 – торфяная типичная почва на травяном торфе (контроль). Определение эмиссии CO_2 выявило наибольшее различие между исследованными участками. В агроторфяных почвах скорость минерализации органического вещества была значительно выше, что выражалось в увеличении УП CO_2 из почв в атмосферу. На 1-м участке эмиссия CO_2 достигла 54.8 нмоль $\text{CO}_2 \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. На участке 2 – 32.2 нмоль $\text{CO}_2 \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. На 3-м участке – 91.4 , а на 4-м – 10.1 нмоль $\text{CO}_2 \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Анаэробная минерализация органического вещества доминировала на контрольных участках. На участке 1 скорость эмиссии метана составила 0.7 нмоль $\text{CH}_4 \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. На участке 2 – 2.3 нмоль $\text{CH}_4 \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. На 3-м участке – 0.2 , а на 4-м – 1.4 нмоль $\text{CH}_4 \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Величина потока N_2O из исследованных почв достигла значимых величин только в агроторфяных почвах, что связано с внесением азотных удобрений. Полученные данные свидетельствуют о том, что основным парниковым газом, образующимся в агроторфяных почвах, является CO_2 . В естественных торфяных почвах доминирует метан. Однако, его количество на порядок меньше по сравнению с CO_2 , образующимся в агроторфяных почвах. Установлено, что торфяные почвы, находящиеся на ранней стадии освоения, отличаются высокой эмиссией парниковых газов. Напротив, многолетнее сельскохозяйственное использование торфа приводит к снижению эмиссии парниковых газов.

[Новиков с соавт., 2004]. Установлена зависимость интенсивности эмиссии парниковых газов от возраста освоения торфяных почв. Низкая скорость эмиссии CO_2 , CH_4 и N_2O зарегистрирована в торфяной почве с наибольшим временем освоения (более 80 лет), максимальная эмиссия парниковых газов установлена в торфяной почве, находящейся на первой стадии освоения. Установлен пик активности процессов эмиссии и поглощения парниковых газов, приходящийся на конец июля – начало августа.

[Новиков с соавт., 2007]. В модельных биогеоценозах на примере торфяных почв долины р. Яхромы проведена оценка основных показателей функционирования почв как источника и стока парниковых газов, образующихся при минерализации торфа в зависимости от регулируемого уровня грунтовых вод и сроков освоения. Методами газовой хроматографии определена интенсивность образования и эмиссии трех основных газов, ответственных за глобальные изменения климата – CO_2 , CH_4 и N_2O . В результате исследования установлено, что внесение KNO_3 сопровождалось снижением эмиссии метана из почв, и приводило к возрастанию скорости окисления метана. Возможным объяснением этого может служить дополнительное окисление метана в анаэробных условиях с использованием нитратов в качестве конечных акцепторов электронов. Кроме того, нитрат является доступной и часто предпочтительной формой азота для большинства метанотрофов и оказывает на их активность стимулирующее действие.

[Новиков с соавт., 2010]. Цель работы заключалась в выяснении особенностей процессов эмиссии и поглощения парниковых газов в торфяных почвах при осушении и длительном сельскохозяйственном использовании (30, 60 и 90 лет). В качестве контрольной была выбрана неосушенная торфяная почва. Сезонная динамика эмиссии парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) из торфяных почв изучалась на протяжении вегетационного периода. Минимальная интенсивность эмиссии была отмечена в апреле. К середине лета активность дыхания агроторфяных почв повышается при снижении эмиссии метана, что вероятно обусловлено понижением уровня грунтовых вод. Большое количество дождевых осадков в конце сентября – начале октября способствует повышению уровня грунтовых вод и приводит к увеличению эмиссии метана. В период низкого уровня грунтовых вод осушенная толща агроторфяной почвы работает как метанпоглощающий фильтр, который окисляет метан, образующийся в анаэробной зоне. Это приводит к

снижению общего потока метана из почв в атмосферу. Активность эмиссии парниковых газов на протяжении всего периода исследований в агроторфяной почве срока использования 90 лет в 2 раза ниже по сравнению с агроторфяными почвами 60-ти лет использования, и в 5-6 раз ниже по сравнению с агроторфяными почвами 30-ти лет использования; причем в двух последних (30-60 лет использования) она в 3-4 раза выше, чем в контроле. Установлено, что в осушенных торфяных почвах 30-90 лет сельскохозяйственного использования до 92% потерь углерода осуществляется в виде CO_2 . Напротив, в неосушенных торфяниках от 45 до 80% углерода теряется в виде метана.

[Паников, 1998]. Настоящее сообщение посвящено анализу устойчивости развития не отдельно взятой почвы, а Земли как целостной системы. Речь идет о возможных причинах глобальной дестабилизации климата в связи с нарушением теплового баланса планеты, вызванного изменениями состава атмосферы, в частности аккумуляции так называемых парниковых газов. Однако приводится множество конкретных экспериментальных данных по образованию, поглощению и эмиссии CH_4 почвами Бакчарского болота (Томская обл.) в зависимости от факторов внешней среды – температуры, уровня стояния воды и концентрации поллюганта (нитрата калия).

[Паников и Зеленов, 1992]. В настоящем сообщении изложены результаты, полученные в Институте микробиологии РАН совместно с Институтом лесоведения и Институтом биологии Коми НЦ РАН по изучению количественных закономерностей газообмена CO_2 и CH_4 между некоторыми заболоченными почвами Европейского Севера и атмосферой, при этом особое внимание было уделено тому эффекту, который оказывают на процессы газообмена криогенные явления.

[Паников с соавт., 1992]. В работе суммированы результаты изучения закономерностей образования и потребления метана в пяти наземных экосистемах Европейской равнины от Крыма до Полярного Урала. Получены данные о профилном распределении CH_4 в почвенном воздухе, а также о динамике газообмена CH_4 в зависимости от режима увлажнения, температуры, солености, типа растительности и других экотопических факторов. Наибольшие скорости как образования, так и потребления CH_4 обнаружены в неосушенных верховых болотах и местах активного разложения нагонной массы морских водорослей. Цикл метана в большинстве изученных почв оказался замкнутым: процессы метаногенеза в нижних горизонтах уравнивались процессами метаноокисления в верхних горизонтах. Исключения составляли гиперсоленые лагуны и мочажины верховых болот, в которых активность метанопотребляющих микроорганизмов отсутствовала или была понижена. В этом случае наблюдалась эмиссия CH_4 из почв в атмосферу, которая достигала $50-100 \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$.

[Русалимова с соавт., 2010]. Цель данного исследования – дать оценку влияния потепления на баланс CO_2 в кустарничково-лишайниковой тундре, широко распространенному и малоизученному типу экосистем в Арктике. Проанализированы скорость круговорота углерода во всей экосистеме и динамика биомассы растений после двух лет экспериментального потепления. Исследования поддерживают основную гипотезу, что тундровые экосистемы при повышении температуры в кратковременном периоде перейдут от стока к источнику углерода в виде CO_2 .

[Сурин и Чистотин, 2007]. В 2005 г. исследования были организованы на Дубненском болотном массиве (Московская обл.), часть которого была осушена и освоена в 1979 г. Объекты круглогодичных измерений потоков газов включали участки добычи торфа, используемые после торфодобычи как сенокос и сохраненные в естественном состоянии. Использовался СКа метод и газовая хроматография для анализа концентраций. Для интерпретации и экстраполяции значений потоков велось измерение уровня грунтовых вод, а также мониторинг температуры воздуха и почвы. Специальные измерения были проведены для учета суточных изменений потока газов. Были определены суммарные потери углерода в результате хозяйственного использования. Для естественного болота и используемых торфяников отмечен общий сезонный ход эмиссии парниковых С-газов: рост, начиная со снеготаяния, достижение максимума летом, постепенное уменьшение к концу осени. Сезонный ход более выражен для CO_2 . Уникально теплые условия зимы 2006-2007 гг. характеризовались потоками, сравнимыми с осенними, существенно превышающими эмиссию зим прошлых лет. Авторы считают, что это может быть использовано для прогноза возможной реакции болот и торфяников на потепление климата, проявляющееся в Северном полушарии, прежде всего, в холодный период года. Полученные результаты свидетельствуют о сомнительности встречающегося мнения о естественных болотах как обязательном источнике поступления метана в атмосферу и о том, что осушение сокращает его эмиссию. Данные показывают, что сосново-кустарничково-сфагновые микроландшафты, широко распространенные в бореальной зоне, могут являться поглотителем метана большую часть года, частично компенсируя выделение из соседних более увлажненных местообитаний. С другой стороны, эмиссия CH_4 не прекращается полностью даже с осушенной поверхности торфяников, используемых для фрезерной добычи торфа; во влажные периоды после дождей или снеготаяния выделение CH_4 отмечается даже с буртов складирования торфа. Очень интенсивная эмиссия происходит из осушительных каналов. В результате, несмотря на незначительную площадь, занятую каналами, осушенные для добычи торфа или

сельскохозяйственного использования торфяники продолжают оставаться источником поступления метана в атмосферу.

[Смагин с соавт., 2003] – см. [Глаголев с соавт., 2003а] выше.

[Честных и Лопес де Греню, 2003]. Предметом настоящей работы является изучение скорости возобновления послепожарного состояния почвы и растительности в субарктической тундре северо-востока Европейской части России (процессы изменения климата могут вести к существенному уменьшению летних осадков и, соответственно, высыханию растительного покрова и верхних органических горизонтов почвы, что увеличивает вероятность тундровых пожаров). Полевые площадки были расположены в Воркутинской области. Область принадлежит субарктической тундре (южная тундра в российской терминологии). Две различных гаревых площадки (после пожаров 1988 и 1993 гг.) были расположены в кустарниковой тундре. Интенсивные наблюдения выполнялись в 1996 г. и были повторены в 1999 г., в вегетационный сезон. Исследование включало в себя измерение потоков CO_2 , определение фитомассы различных фракций, состава почвы и оценку влияния абиотических факторов на гаревых и контрольных участках. Начиная с 2000 г., определение фитомассы различных фракций выполнялось ежегодно. Пожар в изучаемом типе тундры ведет к потерям $\approx 2 \text{ кг} \cdot \text{C} \cdot \text{м}^{-2}$ (из них 0.5 кг составляет наземный углерод и 1.5 кг – подземный). 10% наземного углерода восстанавливается в течение 2 лет после пожара, 50% в течение 8 лет и 110% в течение 15 лет. GPP восстанавливается быстрее: через 2 года после пожара GPP достигает 50% от контроля, через 5 лет 115% и через 11 лет 130%; R_{eco} также увеличивается, но медленно (соответственно – 46%, 70% и 108%). Пул углерода почвы представляет собой наиболее медленно восстанавливаемый ресурс. Только 20% углеродных потерь было восстановлено через 11 лет.

[Честных с соавт., 2007]. На протяжении последних 10 лет в южных кустарниковых тундрах окрестностей г. Воркуты проводились комплексные исследования, основная цель которых состояла в характеристике кратко- и среднесрочных эффектов влияния климатических изменений на процессы обмена парниковых газов. В полевых условиях получены оценки потоков CO_2 и CH_4 . В лабораторных условиях исследованы микробиологические механизмы, контролирующие величины эмиссии метана. Проводился мониторинг абиотических параметров, в том числе температур воздуха и почвы, глубин сезонного оттаивания, влажности верхнего слоя почвы. Показано, что температура является важным фактором, определяющим знак суточного баланса CO_2 южных тундр в период активной вегетации. Наибольшие величины стока имеют место при среднесуточных температурах 11-12 °C. Обратимая смена знака баланса со стока на источник происходит при 14-15 °C. Переключения знака баланса определяется в первую очередь величиной валового дыхания, более чувствительного по сравнению с продукцией к текущему значению температуры. В исследуемом регионе отмечается явная тенденция к увеличению температур теплого периода, в результате аномально теплые дни встречаются все чаще. Поэтому выявленный краткосрочный механизм сказывается и на больших временных масштабах. Результаты моделирования показывают, что южная кустарниковая тундра была стоком углерода лишь в 2 из последних 5 теплых сезонов. Температура оказывает влияние и на эмиссию метана. Максимальные скорости выделения CH_4 были зафиксированы при 8-10 °C. Наряду с метаногенной в почвах южной тундры установлено наличие метанооксиляющей активности. Совокупность этих разнонаправленных процессов определяет величину эмиссии. Показано, что при 5 °C окисление метана доминирует над его образованием во всех почвенных горизонтах. Это свидетельствует о существовании психрофильного бактериального метанооксиляющего сообщества, являющегося фильтром не только для вновь образованного, но и для депонированного в почвах CH_4 . Если временная динамика баланса парниковых газов в тундрах определяется в первую очередь температурой, то его пространственная мозаика связана с гидрологическими условиями почвы. Тундровые ландшафты представляют собой территориальные комплексы понижений с высокой влажностью почвы и повышений различных уровней рельефа с меньшей влажностью. Сообщества понижений (в основном, осоково-сфагновые) преимущественно демонстрируют сток CO_2 из атмосферы, но являются источником атмосферного метана, в то время как повышений (кустарничково-лишайниковые) чаще являются источником CO_2 , но фильтром для метана.

[Шнырев и Глаголев, 2006]. Целью работы было измерение потоков на болотах различных типов, как естественных, так и осушенных. Исследования проводились в летне-осенние периоды 2004-2005 гг. и включали более 70 объектов в Бакчарском и Шегарском районах Томской области: в пойме р. Иксы; на переходном болоте “Бакчарское” (неосушенный и ранее осушавшийся участки); пожарищах (1999 и 1998 гг.); на низинных болотах “Правое” (осушенное), “Ближнее” и “Обское” (естественные); на верховых болотах “Гусево” (осушенное), “Гавриловское” и “Карагайское” (естественные). Измерения велись статическим камерным методом, преимущественно днем. По убыванию интенсивности эмиссии CH_4 ($\text{мг} \cdot \text{C} / \text{м}^2 / \text{час}$) объекты можно расположить в следующем порядке (по данным за 2005 г.; после знака «±» приведены стандартные ошибки, в скобках указаны объемы выборок) – от низинного естественного к верховому осушенному: “Обское” 16.8 ± 2.4 (8), “Бакчарское” 11.4 ± 0.2 (259), пойма р. Икса 7.6 ± 1.8 (46), “Ближнее” 4.9 ± 0.5 (52), “Карагайское” 3.4 ± 0.4 (4), “Правое” 1.8 ± 0.2 (31), “Гусево” 0.06 ± 0.04 (12). Наибольшей

эмиссией отличались дренажные каналы на болотах: “Правом” 37.5 ± 6.2 (9), “Гусево” 1.2 ± 0.2 (4). Гари разного возраста поглощали CH_4 . Наиболее подробно сезонная и суточная динамика потока изучалась на примере естественных участков, занятых растительными ассоциациями с преобладанием *Equisetum fluviatile* (“Хвощ”) и *Carex rostrata* (“Осока”) на Бакчарском болоте. Динамика потока в сезонном масштабе времени на этом болоте хорошо коррелирует ($R=0.82$) с разностью температур почвы на глубинах 5 (T_5) и 15 (T_{15}) см: $F=k_0+k_1(T_5-T_{15})+k_2A$, где A – код растительной ассоциации, равный 1 для “Осоки” и 2 для “Хвоща”, $k_0 = -7.22 \pm 2.62 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, $k_1 = 1.88 \pm 0.45 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $k_2 = 10.99 \pm 1.47 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$.

[Шнырев и Глаголев, 2007; Шнырев и Глаголев, 2007а]. В работе суммированы собственные и литературные данные по многочисленным измерениям эмиссии CH_4 на территории Западной Сибири в различных гидротермических условиях и на болотах различных типов. Статистическая обработка всего массива данных позволила получить относительно надежные оценки характерных потоков для отдельных природных зон и конкретных биогеоценозов.

[Arneeth et al., 2002]. В бесснежные периоды 1998, 1999 и 2000 гг. на двух бореальных болотах (Федоровское – в Европейской части России и Зотино – в центральной Сибири) методом «eddy correlation» измерялся чистый экосистемный обмен CO_2 (NEE). Климат и там, и там был, в общем, континентальным, но большая разница температур лета/зимы наблюдалась на более восточном исследовательском полигоне (Зотино). Бесснежный период для полигона Федоровское превышал таковой для Зотино на несколько недель. Заметная сезонная и межгодовая разница NEE наблюдалась на обоих полигонах. Среди наиболее важных особенностей авторы отмечают следующие:

- 1) Экосистемное дыхание при данной температуре почвы было выше на полигоне Федоровское.
- 2) Суточная амплитуда летней NEE была больше также на полигоне «Федоровское».
- 3) По косвенным данным можно предположить, что более высокая продуктивность характерна для Зотино.
- 4) Суммарное чистое потребление CO_2 за весь бесснежный период четко определялось климатическими особенностями года. В Зотино межгодовая изменчивость климата и, следовательно, баланса CO_2 в течение бесснежного периода были относительно малы. Но на полигоне «Федоровское» в один год болото было существенным стоком углерода, а на следующий год (более сухой, чем в среднем) – значительным источником С- CO_2 .

[Arneeth et al., 2006]. В работе сравниваются УП CO_2 , измеренные методом МиВП в четырех различных экосистемах, среди которых есть и сибирское болото (60.8° с.ш., 89.4° в.д.). На болоте измерения проводились на высоте около 4 м с июня 1998 г. по ноябрь 2000 г.

[Bohn et al., 2007]. В основном работа посвящена моделированию эмиссии метана из типичного для южной тайги Западной Сибири болотного комплекса, включающего мезотрофное Бакчарское болото (Томская обл.). Однако при обсуждении результатов моделирования авторы, естественно, приводят экспериментальные данные измерений УП CH_4 .

[Chevallard et al., 2002]. В основном работа посвящена моделированию динамики концентраций CO_2 над Европой и Западной Сибирью. Однако, поскольку для этого необходимо было задать пространственное распределение УП источников/стоков CO_2 на подстилающей поверхности, то, конечно, авторы приводят экспериментальные данные, в частности – по измерениям в июле 1998 г. на исследовательских полигонах «Федоровское» (южная тайга; около 300 км к СЗ от г. Москва) и «Зотино» (600 км севернее г. Красноярск). На полигоне «Федоровское» осуществлялось три типа измерений CO_2 : во-первых, непрерывные наземные измерения УП в еловом лесу и на сфагновом болоте (соответственно, оборудование для «eddy correlation» размещалось на высоте 30 м и 8 м), во-вторых, непрерывные измерения вертикальных профилей концентрации в атмосфере и, в-третьих, эпизодические измерения концентраций в пробах с высот между 200 и 3000 м (полеты осуществлялись с периодичностью от 2 до 4 нед.). На полигоне «Зотино» осуществлялось два типа измерений CO_2 : во-первых, непрерывные наземные измерения УП в сосновом лесу и на сфагновом болоте (соответственно, оборудование для «eddy correlation» размещалось на высоте 28 м и 6 м) и, во-вторых, регулярные измерения вертикальных профилей концентрации в атмосфере между 50 и 3000 м.

[Christensen, 1993]. Обзорная работа¹⁶ по эмиссии CH_4 с территории, расположенной севернее 50° с.ш. Среди прочего приводятся усредненные экспериментальные данные по трем исследовательским полигонам

¹⁶ Относительно ранних работ Кристенсэна (начала-середины 90-х гг. XX-го в.) мы должны предупредить читателя, что они содержат множество ошибок и нелепостей, поэтому относится к излагаемому в них следует с большой долей здравого скептицизма. В частности, в рассматриваемой обзорной работе проявились весьма оригинальные географические взгляды ее автора. На приводимой им карте совершенно ясно видно, что вся территория Белгородской области и прилегающих к ней районов оказывается «влажной тундрой» – «wet tundra». Кроме того, в табл., озаглавленной «Overall averages of thaw season tundra methane flux as measured in various field studies» в качестве одного из таких тундровых исследовательских полигонов он называет стационар Института лесоведения РАН в Тверской области (причем правильно указывает его географическую широту – 56° с.ш.).

на территории России. Также дан обзор факторов среды, влияющих на эмиссию метана, причем показано, что в зависимости от выбранного пространственно-временного масштаба один и тот же фактор может оказывать большее или меньшее влияние на эмиссию. Установлено, что различия во влажности почв, pH и покрытии сосудистыми растениями являются главнейшими причинами пространственных различий в максимальных сезонных УП, а влажность и температура¹⁷ почв являются главнейшими причинами различий суммарных (за весь год) эмиссий.

[Christensen et al., 1995]. В работе приводятся результаты измерений УП CH₄ в тундре по трансекте, проходящей через европейскую и сибирскую Арктику, полученные в июле-августе 1994 г. Среднее УП CH₄ для тундровых ИП с умеренным увлажнением составляло 0.0958 ± 0.0292 мг·м⁻²·час⁻¹ и 1.95 ± 0.2458 мг·м⁻²·час⁻¹ – для влажных местообитаний. УП умеренно влажных местообитаний тундры были ниже, чем ожидалось (на основании данных, полученных в похожих местообитаниях Северной Америки); более того, указанные местообитания могут служить значительными стоками атмосферного метана. Существенные скорости потребления метана вкупе с широким распространением сухих и умеренно влажных местообитаний в тундре позволяют говорить о необходимости учета высокоширотного почвенного стока метана при подсчетах бюджета этого газа. Однако величина эмиссии из влажной тундры между 67 и 77° с.ш., полученная в данном исследовании, была больше, чем ранее полученная для сравнимых местообитаний в более низких широтах (50-55° с.ш.). Отсюда авторы пришли к выводу, что высокие северные широты играют очень большую роль в глобальном бюджете метана. При сравнении влажных и умеренно влажных ИП оказалось, что эмиссия метана возрастает с увеличением температуры и влажности почвы, а также содержания в почве органического вещества. Но эти корреляции целиком относились только к влажным местообитаниям, поскольку то же самое выявилось и при анализе одних только влажных местообитаний, но при анализе одних только умеренно влажных местообитаний никаких зависимостей от параметров внешней среды выявлено не было.

[Christensen et al., 1996]. В основном работа посвящена моделированию эмиссии CH₄ из северных болот и тундры. В используемой модели эмиссия CH₄ задается как доля дыхания гетеротрофов в данной экосистеме. Поскольку для этого необходимо было задать пространственное распределение УП CO₂ на подстилающей поверхности, то, конечно, авторы приводят экспериментальные данные, в частности – по измерениям на 9 влажных ИП¹⁸ в Сибири, описанных ранее в [Christensen et al., 1995].

[Christensen et al., 2000]. В работе изучается роль северных болот как источников или стоков CO₂ и CH₄, в том числе рассматривается влияние биологических, физических и химических факторов на эмиссию CO₂ и CH₄. Исследование соответствующих процессов осуществляется в широком диапазоне пространственных масштабов, вплоть до ландшафта и более – работа проводилась в 1998-2001 гг. на 5 исследовательских полигонах: в Гренландии, Исландии, Финляндии, Швеции и в России (где исследовательским полигоном являлось типичное мезотрофное южно-таежное Бакчарское болото в Томской обл.). Установлено, что, во-первых, в большом пространственном масштабе наилучшим предиктором эмиссии CH₄ является сезонная температура почвы; во-вторых, влияние продуктивности сосудистых

¹⁷ Т. Christensen [1993] выделил три типа температурных зависимостей потока метана, наблюдавшихся в различных местообитаниях: линейную (при этом он ссылается на [Svensson and Rosswall, 1984; Christensen, 1993a]), логарифмическую (со ссылкой на [Crill et al., 1988; Moore and Knowles, 1990; Bartlett et al., 1992]) и экспоненциальную (ссылается на [Moore et al., 1990]). Однако, на самом деле следует говорить лишь о двух основных типах простейших зависимостей – линейной и экспоненциальной. Дело в том, что Moore et al. [1990] не приводят каких-либо формул в своей работе, а просто указывают, что зависимость эмиссии от температуры была экспоненциальной. Общепринятой является следующая математическая интерпретация термина «экспоненциальная зависимость»: $F = a \cdot e^{k \cdot T}$ (см., например, [Прохоров, 1983; Смагин с соавт., 2001; Naumov, 2001a] и др.). Moore and Knowles [1990] и Bartlett et al. [1992] используют формулу $\ln(F) = \ln(a) + k \cdot T$, т.е. ту же самую экспоненциальную зависимость, но после логарифмического преобразования (так поступают для удобства вычисления коэффициентов экспоненциальной формулы линейным методом наименьших квадратов, поскольку это рекомендуется во многих руководствах для биологов, химиков и др. исследователей-нематематиков – см., например, [Румшицкий, 1971; Перт, 1978; Эмануэль и Кнорре, 1984; Эберт и Эдерер, 1988] и др.). Crill et al. [1988] вообще не дают каких-либо формул в своей статье, но строят график зависимости $\ln(F)$ от T , который оказывается прямой линией, как и должно быть для экспоненциальной зависимости! Итак, логарифмическая зависимость потока от температуры (по Christensen) совпадает с экспоненциальной зависимостью (в общепринятом смысле).

Приведем еще один пример. Перечислив три типа зависимости эмиссии от температуры, и среди них – линейную зависимость, процитировав для них статьи, содержащие экспериментальные данные, в следующей фразе (см. стр. 334 [Christensen, 1993]) Кристенсен говорит о том, что линейной зависимости быть не может, поскольку температура влияет как на образование, так и на потребление метана. С точки зрения общепринятой логики это не очень понятно. Ведь если, например, образование линейно зависит от температуры и потребление тоже линейно зависит от температуры, то и эмиссия (как суперпозиция образования и потребления) будет линейно зависеть от температуры.

¹⁸ К сожалению, авторы не указывают – какое значение к какому конкретно ИП относится.

растений существенно зависит от их видов; в-третьих, изученный регион является источником парниковых газов в целом за год, хотя в середине лета, безусловно, наблюдается существенное поглощение CO_2 .

[Christensen et al., 2003]. Представлены результаты, подводящие итог многолетних¹⁹ измерений СКа методом на ИП в Сибири (Плотниково: $57^\circ 01'$ с.ш., $82^\circ 35'$ в.д.), Гренландии, Исландии и Скандинавии. Установлено, что доступность субстратов метаногенеза (выраженная в концентрации органической кислоты в болотной воде) и температура объясняют почти 100% изменчивости среднегодовой эмиссии CH_4 .

[Fedorov-Davydov, 1993]. Определена пространственно-временная вариабельность потока CO_2 , обязанная своим существованием физическим и биологическим факторам (причем представляется, что физические факторы имеют при этом большее значение). Даже с учетом предельных возможностей психрофильных и психротрофных микроорганизмов, едва ли допустимо представить себе существование какой-либо микробной активности в тундре в середине зимы при температуре верхнего слоя почвы до -25°C . Тем не менее, эмиссия CO_2 на некоторых исследовательских полигонах продолжается до февраля, а УП сравнимы с теми, которые наблюдаются летом в гидроморфных ландшафтах. С началом весны эмиссия CO_2 в тропосферу возникает вновь.

[Flessa et al., 2006]. СКа методом с начала лета и до начала зимы 2003 г. осуществлялось измерение УП CH_4 на 7 исследовательских полигонах ($67^\circ 29.90'$ с.ш., $86^\circ 25.56'$ в.д.), располагавшихся приблизительно в 10 км к северу от г. Игарка на осушенном участке восточного берега р. Енисей. Полигоны были выбраны так, чтобы охватить разнообразие типичных ландшафтов региона (и связанное с этим разнообразие растительности, почв, глубины сезонного протаивания и т.д.). Один из полигонов (Р6) представлял собой болотный ландшафт. Использовались темные камеры с площадью основания 706.5 см^2 ; время экспозиции составляло от 10 мин (на полигонах, где метан выделялся) до 1 часа (на полигонах, где он поглощался). Для определения одного значения УП из камеры через равные промежутки времени отбиралось 4 пробы для лабораторного анализа концентрации CH_4 на газовом хроматографе с ПИД. Результаты измерений показали, что интенсивность поглощения почвами атмосферного CH_4 обусловлена распределением вечной мерзлоты и связанным с ним режимом влажности почв. Наряду с поглощением метана почвами наблюдались его высокие эмиссии из термокарстовых озер. Таким образом, формирование термокарстовых озер и дальнейшее развитие этих водных систем является ключевыми факторами, определяющими роль исследованной территории в глобальном цикле метана.

Friborg et al. [2003] считают, что посредством микрометеорологических измерений (в масштабе ландшафта) на самых больших в мире болотах Западной Сибири, они показали, что радиационный форсинг CH_4 более существенен здесь для бюджета парниковых газов, чем форсинг CO_2 . Прямые измерения обмена CO_2 и CH_4 с атмосферой летом 1999 г. показали, что эти болотные экосистемы работают как стоки углерода (в среднем $-20.8333\text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$), но, тем не менее, они представляют собой мощные источники метана. С учетом высокого потенциала глобального потепления для CH_4 , сибирские болота являются причиной существенного радиационного форсинга даже в сравнении с антропогенными эмиссиями.

[Glagolev, 1998; Glagolev et al., 1998]. В основном эти публикации посвящены математической модели, позволяющей рассчитывать эмиссию метана из болот. Модель основана на математическом описании процессов роста растений, снабжения ими корней питательными веществами, разложения органического вещества в почве и образования при этом метана в анаэробных условиях. Входными параметрами модели являются: температура, осадки, географическая широта расположения болота, содержание углерода в торфе и уровень стояния воды. Результатами расчетов по модели являются: сезонная динамика эмиссии CH_4 и интенсивность метанобразования в корнеобитаемом слое почвы. Расчеты показали, что основным фактором, определяющим образование и эмиссию метана, является температура почвы. Естественно, при обсуждении качества моделирования авторы вынуждены рассматривать экспериментальные данные измерения УП CH_4 , полученные статическим камерным методом (на типичном мезотрофном южно-таежном Бакчарском болоте в Томской обл.). Летом 1995 г. средний УП CH_4 с 19.07 по 29.07 составил $14.9 \pm 2.7\text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$ при средней температуре поверхности почвы $21.5 \pm 0.7^\circ\text{C}$; с 30.07 по 3.08 средний УП CH_4 составил $19.3 \pm 3.9\text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$ при средней температуре поверхности почвы $23.4 \pm 0.2^\circ\text{C}$; с 6.08 по 15.08 средний УП CH_4 составил $10.8 \pm 1.5\text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$ при средней температуре поверхности почвы $21.1 \pm 0.4^\circ\text{C}$; с 16.08 по 21.08 $15.5 \pm 2.8\text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$ – при $20.9 \pm 1.2^\circ\text{C}$. Летом 1996 г. средний УП CH_4 с 10.07 по 15.07 составил $6.7 \pm 0.6\text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$ при средней температуре поверхности почвы $19.4 \pm 0.2^\circ\text{C}$; с 16.07 по 21.07 $6.0 \pm 0.8\text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$ при средней температуре поверхности $19.3 \pm 0.2^\circ\text{C}$; с 22.07 по 29.07 $8.6 \pm 0.8\text{ мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$ – при $19.9 \pm 0.1^\circ\text{C}$. Модель продемонстрировала хорошее соответствие с результатами измерения интенсивности метанобразования и длительными наблюдениями эмиссии метана на Бакчарском

¹⁹ В оригинальной работе указано более конкретно: 12-летних. Но, вероятно, на различных ИП авторы проводили свои исследования в течение разного количества лет, поскольку, например, на ИП «Плотниково» никто из авторов не присутствовал более 8 лет.

болоте в 1995-1997 гг. (в работах также приводятся усредненные данные по летней эмиссии с 1993 по 1997 гг. и среднемесячной эмиссии в июле-августе 1997 г.). Кроме того, в работах описан метод измерения актуальной скорости образования метана в почвенном профиле (непосредственно в полевых условиях).

[Glagolev, 2008]. В работе подводятся итоги исследований эмиссии CH_4 на территории Западной Сибири (до 2007 г. включительно) в различных гидротермических условиях и на болотах различных типов. Результаты измерений формализованы в виде «стандартной модели» Aa1, содержащей, во-первых, вероятностные распределения удельных потоков для каждого типа болотного микроландшафта в каждой природной зоне; надежные оценки характерных потоков для отдельных природных зон и конкретных биогеоценозов; во-вторых, электронную карту этих микроландшафтов в Западной Сибири; и, в-третьих, период эмиссии метана в каждой природной зоне. Согласно принятой модели этот период составляет: для зоны тундры – 101 сут., для лесотундры – 118 сут., для подзоны северной тайги – 135 сут., для средней тайги – 163 сут., южной тайги – 168 сут., подтайги – 185 сут. и лесостепи – 197 сут. На основании стандартной модели Aa1 методом Монте-Карло годовая эмиссия метана с болот Западной Сибири оценена величиной 3.7 ± 1.7 Мт углерода.

[Glagolev et al., 1998] – см. [Glagolev, 1998] выше.

[Glagolev et al., 1999]. На типичном мезотрофном южно-таежном Бакчарском болоте (Томская обл.) в июне-августе 1995 г. и в июле-августе 1996 г. изучались интенсивности диффузионного и пузырькового механизмов выноса метана из почвы. В то время, как общая эмиссия метана в осоково-вахтово-сфагновом сообществе составляла в среднем $15.09 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, диффузионный поток оказался лишь $0.08 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, т.е. около 0.5%. В других сообществах отношение диффузионного потока к общему также не превышало 1%. Пузырьковый поток составлял около 30% общего.

[Glagolev et al., 2000]. В работе приведены результаты, полученные при изучении типичного мезотрофного южно-таежного Бакчарского болота (Томская обл.) в экспедициях 1998 и 1999 гг., а также подробно описаны применявшиеся методы: измерения объема газовой фазы почвы; отбора газовых проб из толщи болота; исследования транспорта метана, связанного с растениями; измерения интенсивности окисления метана в толще болота. Установлено, что в толще болота на глубинах ~ 1 м может присутствовать кислород, который поступает на эти глубины, вероятно, через корни растений.

[Glagolev et al., 2000a]. На типичном мезотрофном южно-таежном Бакчарском болоте (Томская обл.) летом 1998 и 1999 гг. изучалось окисление метана в толще болота (методом стабильных изотопов) и вынос метана из почвы, связанный с растениями (микрокамерным методом). Максимальная интенсивность окисления и минимальная эмиссия наблюдались в сообществе с преобладанием *Eriophorum vaginatum* и *Menyanthes trifoliata*. Наоборот, минимальная интенсивность окисления и максимальная эмиссия – в сообществе с преобладанием *Carex rostrata* и *Equisetum fluviatile*. К концу лета наблюдалось увеличение эмиссии во всех растительных сообществах. Интенсивность транспорта метана различалась у разных видов растений, а также определялась сезоном. Всего же, транспорт, связанный с растениями, может обеспечивать до 60% общей эмиссии. Измерения, выполненные для индивидуальных растений определенного вида, коррелировали с измерениями общей эмиссии на участках, где растения этого вида доминировали.

[Glagolev et al., 2001]. В работе кратко суммированы результаты, полученные при изучении типичного мезотрофного южно-таежного Бакчарского болота (Томская обл.) в ежегодных экспедициях с середины до конца 90-х гг. XX в., а также перечислены все использовавшиеся при этом методы и даны ссылки на их подробные описания. Максимальная метаногенная активность наблюдалась на глубине 20-25 см ниже уровня стояния воды и составила $1-2 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$. Было обнаружено, что главным фактором внешней среды, контролирующим эмиссию метана (F , $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$), является температура почвы (T , °C). Получено следующее регрессионное уравнение ($R^2 = 0.8446$): $F = 0.7436 \cdot \exp(0.1365 \cdot T)$, связывающее удельный поток метана со средней температурой поверхности почвы. В полевых условиях был измерен температурный коэффициент « Q_{10} » для эмиссии метана, который оказался в пределах от 3.0 до 4.3 (при наиболее вероятном значении 3.5). Показано, что диффузионная часть потока метана из почвы составляет от <1% до 10% суммарной эмиссии (минимальные значения относятся к насыщенным водой почвам, а максимальные – к ненасыщенным); около 30% метана выносятся пузырьковым транспортом; от 40 до 60% (в зависимости от сезона) приходится на транспорт, связанный с растениями. В почве под сообществом с доминированием *Equisetum fluviatile* или *Carex rostrata* 15-45% метана, образовавшегося в толще болота, окисляется еще до выхода в атмосферу, а под сообществом с доминированием *Menyanthes trifoliata* или *Eriophorum vaginatum* – 55-80%. Причем под сообществом с доминированием *Menyanthes trifoliata* 15-20% CH_4 окисляется в слое 70-120 см.

[Glagolev et al., 2001a]. В работе приведены результаты, полученные при изучении типичного мезотрофного южно-таежного Бакчарского болота (Томская обл.) в экспедиции 2000 г. Показано, что в геохимически сходных болотных ландшафтах при одинаковых температурных условиях главным фактором внешней среды, контролирующим эмиссию метана (F , $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$), является уровень стояния болотных вод

(WTL, см; на болоте отсчитывается от поверхности мха вглубь почвы, т.е. при стоянии воды выше поверхности мха $WTL < 0$). Получено следующее регрессионное уравнение: $F = 1.758 \cdot \exp(-0.0681 \cdot WTL)$, $R^2 = 0.8998$. Также приведены данные по эмиссии CO_2 в темноте в зависимости от уровня стояния воды (полученные результаты измерений сравниваются с известной моделью [Potter, 1997]). Установлено, что в среднем, в толще Бакчарского болота (до выхода на поверхность) окисляется $50 \pm 13\%$ образующегося метана. В связи с этим данное болото является источником метана со средним изотопным составом, характеризующимся значением $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 = 59.3 \pm 7.7 \text{ ‰}$.

[Glagolev et al., 2010]. В работе представлены результаты измерений удельного потока метана в западно-сибирской тундре, проведенных в 2009 г.: в августе на мезотрофных болотах (41 измерение), озерах (33 измерения) и в декабре на олиготрофных болотах (68 измерений). Все исследовательские полигоны были расположены недалеко от пос. Тазовский ($67^\circ 28'$ с.ш., $78^\circ 45'$ в.д.) в зоне непрерывного распространения многолетне-мерзлых пород. Измерения осуществлялись при помощи плексигласовых камер ($40 \times 40 \times 40 \text{ см}^3$). Летом камеры устанавливались на основания из нержавеющей стали, а зимой – непосредственно на снег (с заглублением нижней кромки камеры в снег около 15 см). Измерение одного значения удельного потока занимало 30-45 минут, в течение которых из камеры отбиралось 4 пробы (для определения концентрации CH_4 методом газовой хроматографии). Удельные потоки вычислялись методом линейной регрессии (концентрации по времени). Летом (на мезотрофных болотах и озерах) измерялись некоторые характеристики факторов внешней среды (рН, ЕС, концентрация O_2 в воде и температурный профиль); зимой – только температурный профиль снега и температура атмосферы. Против ожиданий, потребление метана было обнаружено зимой, когда низкие температуры и наличие снежного покрова исключают возможность какого-либо биологического объяснения этого. Авторы предложили физическое объяснение, основанное на адсорбции метана снегом. В таком случае эмиссия должна зависеть от разницы температур воздуха (T_{air}) и снега (T_{surface}): если в начале измерения в камере $T_{\text{air}} > T_{\text{surface}}$, то T_{surface} будет возрастать в течение времени экспозиции, что вызовет десорбцию метана и, следовательно, в камере будет зафиксирована «эмиссия». Если в начале измерения в камере $T_{\text{air}} < T_{\text{surface}}$, то T_{surface} будет уменьшаться, что вызовет адсорбцию метана снегом, следовательно, в камере будет зафиксировано «поглощение» CH_4 . Действительно, была обнаружена зависимость осредненных (для каждой наблюдавшейся разности температур) удельных потоков от разности T_{air} и T_{surface} , однако в силу того, что удельные потоки оказались весьма малы (и поэтому определялись со значительной относительной погрешностью), статистическая достоверность этой зависимости невысока. В любом случае, при подсчете годовой эмиссии в тундре зимними потоками можно пренебречь в связи с тем, что медиана удельного потока была нулевой, как это отмечено выше. Для выявления основных факторов среды, управляющих эмиссией метана из озер в летний период, авторы использовали метод «пошаговой регрессии», с помощью которого была получена следующая зависимость ($R^2 = 0.654$): $F = a_3 \cdot ([\text{O}_2]_{20} - [\text{O}_2]_5) + a_4 \cdot \text{pH}_{\text{max}}$ (где F – удельный поток метана [$\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$]; $[\text{O}_2]_{20}$ и $[\text{O}_2]_5$ – концентрации растворенного кислорода [мг/л] на глубинах 20 и 5 см, соответственно; $a_3 = 0.91 \pm 0.14 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, $a_4 = 0.09 \pm 0.02 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$; pH_{max} – максимальное значение рН в слое воды 0-50 см). Переменная « pH_{max} » может характеризовать условия минерального питания, а $([\text{O}_2]_{20} - [\text{O}_2]_5)$ – градиент растворенного кислорода.

[Golovatskaya et al., 2001]. С 1998 по 2000 гг. в естественных олиготрофных биогеоценозах (осоково-сфагновая топь, низкий и высокий рямы) на ландшафтном профиле р. Ключ (Бакчарское болото, Томская обл.), а также в биогеоценозах, подвергшихся антропогенному изменению (осушенный для целей лесомелиорации низкий рям и частично выработанные месторождения низинного торфа «Сухое-Вавиловское» и «Таган»), измерялась биомасса растений в период ее максимального накопления (конец июля – начало августа) и эмиссия CO_2 (каждые 10 дней с мая по сентябрь абсорбционным методом в 3-кратной повторности с предварительным срезанием зеленых частей растений). Целью работы являлось изучение динамики потоков углерода в болотах разных типов. В годы исследований эмиссия CO_2 в естественных биогеоценозах составляла 45.3-65.6, 80.3-136.6 и 60.0-63.8 $\text{гC} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, соответственно, для осоково-сфагновой топи, низкого и высокого рямов; а в антропогенно-измененных²⁰ – 87.9-117.8, 158.1-256.7 и 207.0-430.9 $\text{мгCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, соответственно, для осушенного низкого ряма и частично выработанных месторождений низинного торфа «Сухое-Вавиловское» и «Таган». Также в работе приводятся некоторые литературные данные по эмиссии CH_4 .

[Heikkinen et al., 2002]. При помощи СКа метода в 1999 г. измерялись УП CH_4 и CO_2 из болотных экосистем восточно-европейской тундры ($67^\circ 23'$ с.ш., $63^\circ 22'$ в.д.). 29 исследовательских полигонов

²⁰ Обращаем внимание читателя, что авторы приводят разные единицы для эмиссии из естественных и антропогенно-измененных болот. К сожалению, мы не можем перевести одни единицы в другие, поскольку, реально измерив эмиссию за час, авторы в дальнейшем должны были переходить к годовой эмиссии, приняв какую-то величину продолжительности «активного сезона», а не просто умножив эмиссию за час на $365 \cdot 24 \text{ час/год}$.

размещались на различных типах мочажин (WF – wet flarks; IF – intermediate flarks; WL – wet lawns; IL – intermediate lawns) и буграх пучения (НСК – hummocks). Сезонная величина NEE варьировала от *эмиссии* $104 \text{ мгСО}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ до *потребления* $249 \text{ мгСО}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Для того, чтобы оценить фотосинтез и дыхание на каждом исследовательском полигоне, были построены регрессионные модели. Суммарный фотосинтез (и дыхание) за 100-дневный летний период составили 68 (37), 131 (77), 176 (126), 164 (129) и 189 (187) $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2}$, соответственно, на WF, IF, WL, IL и НСК. Потери углерода в зимний период оценивались как 23.7%, 5.0%, 3.1%, 2.6% и 2.3% от величины NEE. Эмиссия СН_4 за летний (зимний) период составила 7.7 (7.8), 6.6 (0.8), 8.2 (0.4), 0.7 (0.3) и 0.1 (0.2) $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2}$, соответственно, на WF, IF, WL, IL и НСК. Моделирование углеродного баланса показало, что сухие бугры пучения были источниками $7.5 \text{ гС} \cdot \text{год}^{-1}$, а мочажины – стоками от 2.2 до $35.9 \text{ гС} \cdot \text{год}^{-1}$. Полученные в работе результаты показывают важность состава растительности и величины уровня стояния воды для годовой динамики в болотах тундры.

[Heikkinen et al., 2004]. При помощи метода статических камер с начала июня по середину сентября 2001 г. измерялись удельные потоки СН_4 и СО_2 из экосистем тундры Восточно-Европейской части России. Целью работы было: определить сезонный (за 100 сут.) баланс углеродсодержащих газов наземных экосистем с различными типами растительности. Также измерялся газовый баланс для водных экосистем указанного региона. Полученные в 2001 г. УП сравнивались с УП, измеренными в более холодном и влажном 1999 г. Сфагновый торфяник (*Sphagnum sp. dominated peat plateau fen*) и осоково-сфагновые мочажины (*Carex sp. and Sphagnum sp. dominated intermediate flarks*) были стоками углерода (от 106 до $110 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2}$, соответственно). Кроме того, на этих исследовательских полигонах эмиссии метана были наибольшими. Другие типы поверхности являлись источниками углерода ($28\text{-}118 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2}$).

[Heyer et al., 2002]. В 7 различных экосистемах субарктической тундры полуострова Ямал (Западная Сибирь) измерялась эмиссия СН_4 при помощи статического камерного метода. Эти измерения проводились как в середине лета (август 1995 г.), так и во время весеннего снеготаяния (июнь 1996 г.). Полученные результаты представляют собой один из наиболее обширных наборов данных по эмиссии СН_4 в сибирской тундре и подтверждают значимость этого региона, как важного источника атмосферного метана. Средние УП в августе составили $0.1767\text{-}8.1375 \text{ мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Наибольшие УП наблюдались на болоте, постоянно покрытом слоем воды, а наименьшие – на сухом исследовательском полигоне в полигональном болоте. Средние УП в июне составили $0.0067\text{-}2.3417 \text{ мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. На 4 из 5 исследовательских полигонов УП возрастали от $0.1\text{-}0.6292 \text{ мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ в начале периода измерений до $1.0083\text{-}6.5 \text{ мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ в его конце. Решающим параметром, влияющим на пространственную изменчивость УП метана, являлся уровень стояния воды, тогда как температура была наиболее важным фактором, контролирующим временную изменчивость, особенно при весеннем снеготаянии. Однако краткосрочные изменения температуры воздуха не оказывали влияния на эмиссию, в частности, никогда не наблюдалась ее суточная динамика. В дополнение к прямому влиянию температуры на метаногенез было выявлено ее косвенное воздействие (через оттаивание почвы): увеличение глубины протаивания коррелировало с эмиссией метана. Быстрые изменения уровня стояния воды приводили к эпизодической значительной эмиссии. Результаты измерений показывают, что значительная эмиссия метана происходит даже весной, когда отсутствует активный растительный покров (т.е. не работает связанный с растительностью механизм транспорта метана из почвы в атмосферу). Это является, во-первых, следствием высокой скорости образования метана даже при низких температурах и, во-вторых, диффузии как главного механизма транспорта. Однако весной эмиссия СН_4 , все же, превышала его вычисленную продукцию, что позволяет предположить выход не только метана, образующегося в это время, но и накапливавшегося в течение всего предшествовавшего года.

[Ikkonen et al., 2001]. Исследования проводились на безлесном кустарничково-пушицево-сфагновом мезо-олиготрофном участке эвтрофно-мезотрофного болота в подзоне средней тайги на юге Карелии. Часть болота была осушена в 1983 г. при помощи дренажных канав глубиной 1 м, проложенных через каждые 40 м. На нетронутой части болота мощность торфа составила 2.2 м. Верхний его слой (0-0.4 м) представлял собой верховой сфагновый торф с плотностью $0.028 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ и степенью разложения в среднем 5-10%, а следующий слой (0.4-0.7 м) – переходный сфагновый торф со степенью разложения 15%. На осушенной части верхний слой (0-0.3 м) представлял собой верховой сфагновый торф с плотностью $0.04 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ и степенью разложения в среднем 10%, а следующий (0.3-0.6 м) – переходный сфагновый торф со степенью разложения 15-20%. Измерения УП СО_2 осуществлялись с июня по сентябрь 1994 г. при помощи камерного метода. Величины валового дыхания экосистемы, усредненные за указанный период, составили 3.17 и $6.11 \text{ гСО}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, соответственно, на естественных и осушенных участках.

[Inoue et al., 1995]. На типичных для Западной Сибири болотах при помощи камерного метода измерялись удельные потоки СН_4 и СО_2 . В зависимости от значений факторов внешней среды УП СН_4 варьировали от -0.83 до $100 \text{ мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Была обнаружена положительная корреляция УП с температурой почвы, уровнем стояния воды и рН, однако соответствующие коэффициенты корреляции были малы. По результатам измерений в различных точках болот построены вероятностные распределения УП

CO₂ (в темноте) и CH₄, оказавшиеся, соответственно, нормальным и лог-нормальным. Также в работе при обсуждении полученных результатов приводятся данные по средним УП в различных регионах России.

[Inoue et al., 1997]. На типичном для южной тайги Западной Сибири мезотрофном Бакчарском болоте при помощи камерного метода измерялись удельные потоки CH₄. Была обнаружена весьма слабая положительная корреляция УП с температурой почвы на глубине 5 см, но выявлена зависимость УП от типа растительной ассоциации. Кроме того, в работе приведены данные о содержании растворенного метана в профиле болотной почвы под различными растительными ассоциациями.

[Izumi et al., 1994, 1994a]. Для изучения пространственного распределения CO₂ над центральной частью Западно-Сибирской низменности в июле 1992 и 1993 гг. были выполнены измерения с борта самолета-лаборатории. Основные полеты производились в направлении ЮЮЗ<-->ССВ на левобережье Иртыша, который пересекался траекториями полетов приблизительно в районе г. Ханты-Мансийск (где также выполнялись измерения с помощью наземного лидара). Кроме того, был выполнен полет с запада на восток севернее р. Обь и обратно – южнее. Установлено, что ночные инверсионные слои, формирующиеся над подстилающей поверхностью, утром не распадаются. Было выполнено несколько полетов ниже и выше этих слоев. Величины концентрации CO₂ ниже слоя инверсии оказались больше, чем концентрации выше этого слоя, что обусловлено эмиссией CO₂ с подстилающей поверхности, складывающейся, вероятно, из дыхания растений и почвы. С течением времени концентрация CO₂ ниже инверсионного слоя убывала, тогда как выше него – оставалась неизменной. На основании результатов измерений этих концентраций и высоты инверсионного слоя (которая оценивалась по вертикальным профилям температуры) был приблизительно рассчитан удельный поток CO₂ в утренние часы (с 8:35 до 10:25), обусловленный потреблением растениями, которое составило 90-300 гС·м⁻²·час⁻¹.

[Jagovkina et al., 2000]. Для оценки эмиссии метана по измерениям поля его концентраций была построена мезомасштабная 3-мерная модель тропосферного переноса (с учетом фотохимических процессов). Географически модель охватывала ряд регионов Западной Сибири, в частности, расчеты проводились для окрестностей г. Ханты-Мансийск. Модель настраивалась по результатам измерений концентрации метана вблизи поверхности почвы и в нижней тропосфере, осуществлявшихся в течение июля 1993 г. и июня 1996 г. Сравнение наблюдаемых концентраций с рассчитанными по модели позволило определить, что в июле 1993 г. средний удельный поток метана из естественных источников составлял здесь 6.67 ± 1.67 мг·м⁻²·час⁻¹.

[Kazantsev et al., 2010]. Измерены УП CH₄ из внутриболотных озер большинства природных зон Западной Сибири: 16 исследовательских полигонов суммарно в тайге (северной, средней, южной тайге и подтайге), по одному полигону в лесостепи и лесотундре; 5 – в тундре. Измерения проводились летом-осенью 2007 г. и летом 2008 и 2009 гг. Использовались плавающие на поверхности озера статические камеры (основание: 40×40 см, высота: 30 см или 40 см). Из камеры каждые 7-10 минут отбиралась проба. Удельный поток вычислялся по 4 пробам посредством линейной регрессии концентрации по времени (концентрация CH₄ в пробах определялась методом газовой хроматографии). Для каждого УП измерялись значения факторов внешней среды (рН, электропроводность и профиль температуры почвы). Ниже приведены 1-ые квартили/медианы/3-и квартили (мгС·м⁻²·час⁻¹) для УП CH₄ из внутриболотных озер всех исследованных природных зон: лесостепь – 98.0/125.6/146.0; подтайга – 62.0/84.6/170.3; южная тайга – 2.4/3.8/12.5; средняя тайга – 0.1/0.4/1.4; северная тайга – 0.01/0.1/1.2; лесотундра – 0.3/0.6/1.4; тундра – 0.3/0.6/1.1. Величины УП зависели от рН, причем максимальные значения наблюдались при рН = 5.2-5.4. УП CH₄ из озер в лесостепи и субтайге были выше, чем в окружающих болотах, тогда как в других природных зонах Западной Сибири УП из внутриболотных озер и болот были сопоставимы.

[Kazantsev et al., 2011]. Измерены удельные потоки CH₄ из олиготрофных и мезотрофных болот тундры близ пос. Тазовский (южная тундра) и пос. Гыда (граница типичной и арктической тундры). Измерения осуществлялись при помощи плексигласовых камер (площадью 40×40 см² и высотой 30-40 см). Летом камеры устанавливались на основания из нержавеющей стали, а зимой – непосредственно на снег (с заглублением нижней кромки камеры в снег около 15 см). Измерение одного значения удельного потока занимало на озерах 21-30 минут, а на болотах – 30-60 минут, в течение которых из камеры отбиралось 4 пробы (для определения в дальнейшем концентрации CH₄ методом газовой хроматографии). Удельные потоки вычислялись методом линейной регрессии (концентрации по времени). В летний период измерялись некоторые характеристики факторов внешней среды (рН, ЕС, концентрация O₂ в воде и температурный профиль); зимой – только температурный профиль снега и температура атмосферы. В южной тундре летом на олиготрофном и мезотрофном болотах, приозерных сплавинах и на озерах были получены, соответственно, следующие УП (1-ая квартиль / медиана / 3-я квартиль, мгС·м⁻²·час⁻¹): 0.00 / 0.22 / 0.74, 0.22 / 2.18 / 3.69, 0.99 / 2.42 / 3.24 и 0.17 / 0.32 / 0.65; зимой на олиготрофных болотах: -0.04 / 0.00 / 0.12 мгС·м⁻²·час⁻¹ (положительные величины указывают на эмиссию в атмосферу, отрицательная – на поглощение из атмосферы). На границе типичной/арктической тундры летом на

олиготрофном и мезотрофном болотах и на озерах были получены, соответственно, следующие УП: 0.83 / 0.93 / 1.02, 0.63 / 1.20 / 1.72 и 0.12 / 0.18 / 0.28 мгС·м⁻²·час⁻¹. На основе стандартной модели Vc8 годовой поток CH₄ из тундры Западной Сибири оценен величиной 0.14 Мт, что составляет 4% от общего потока из болот всей Западной Сибири.

[Kirschke et al., 2008]. В основном работа посвящена моделированию биогенных удельных потоков CH₄ в Арктике при помощи модели, входными данными которой являются метеорологические данные ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts), а также ДДЗ. Однако при валидации модели авторам приходится рассматривать результаты измерений УП CH₄, полученные в 2006 г. в арктической тундре (дельта р. Лена: 72° с.ш., 126° в.д.).

[Kjellström et al., 2002]. В основном работа посвящена моделированию биогенных УП CO₂ в Европе и Сибири при помощи модели регионального переноса MATCH. Однако при обсуждении качества моделирования авторам приходится рассматривать результаты измерений УП CO₂ для двух хорошо известных исследовательских полигонов в России – «Зотино» (60.5° с.ш., 89.4° в.д.) и «Федоровское» (56.5° с.ш., 33° в.д.), полученных методом МиВП в июле-августе 1998 г.

[Kotsyurbenko et al., 2004]. В основном работа посвящена вопросам микробиологии – метаногенам, населяющим кислый торфяник («Бакчарское болото» в Томской области). Однако в работе приводятся и данные натурных измерений, выполненных летом 1999 г. на этом болоте при помощи камерного метода. Для основных растительных ассоциаций (с преобладанием осоки, хвоща, вахты и др.) приведены кроме средних величин УП CH₄ еще и величины рН болотной воды, концентраций в ней ацетат-, сульфат-, хлорид-, нитрат- и фосфат-ионов, а также даны профили (с шагом в 10 см до глубины 120 см) Eh и изотопного состава CH₄ и CO₂.

[Krasnov et al., 2010] – см. ниже [Maksyutov et al., 1999a].

[Kurbatova et al., 2009]. В основном работа посвящена моделированию возможного влияния изменения климата на УП CO₂ из торфяного болота в Европейской части России при помощи модели Forest-DNDC. Однако при предварительном тестировании модели авторам приходится рассматривать результаты измерений УП CO₂ для олиготрофного болота «Старосельский Мох», расположенного в Центральном Лесном Государственном Заповеднике (56° 27' с.ш., 32° 55' в.д.), полученных методом МиВП в апреле-ноябре 1998-2000 гг.

[Kurganova, 2003, с. 36, 38-48, 50-52, 57-58]. Работа посвящена описанию БД SRDB, содержащей данные по дыханию почв России вообще. Естественно, что среди прочих автором цитируются и многочисленные литературные данные по эмиссии CO₂ из болот.

[Kutzbach et al., 2004]. Изучено влияние микрорельефа и растительности на эмиссию CH₄ в полигональной тундре дельты р. Лена (Северная Сибирь, 72.37° с.ш., 126.47° в.д.). УП CH₄ измерялись камерным методом в пределах типичного полигона с невысокой центральной частью. За время исследований средний УП CH₄ составил 1.1667 ± 0.225 мг·м⁻²·час⁻¹ в центральной части полигона (т.е. в понижении) и лишь 0.1792 ± 0.0333 мг·м⁻²·час⁻¹ на возвышении по краю полигона. Такая пространственная вариабельность в рамках микроландшафта вызвана сильным различием гидрологических условий, которые обуславливают режим аэрации, содержание органического вещества в почве и растительный покров (который также – кроме уровня стояния воды – был важным фактором, контролирующим эмиссию CH₄ в полигональной тундре). Показано, что *Carex aquatilis* (доминирующий вид сосудистой растительности на изучаемой территории) обладает значительной аэренхимой, служащей важным путем транспорта метана. Вклад этого механизма сильно зависит от уровня стояния воды относительно корнеобитаемого слоя. Указанный механизм обеспечивает около 2/3 эмиссии во влажном центре полигона и менее 1/3 на краях полигона. Специальные эксперименты и микро-анатомические исследования позволили предположить, что транспорт метана, связанный с *C. aquatilis*, обусловлен лишь диффузией и ограничен высоким диффузионным сопротивлением плотной экзодермы корней.

[Kutzbach et al., 2007]. В работе проверяется – является ли линейная регрессия действительно подходящим методом для определения УП CO₂ статическим камерным методом при малом времени экспозиции или необходимо использование нелинейной регрессии. СКА метод широко используется для измерения УП CO₂ из почв, покрытых невысокой растительностью. Однако неотъемлемым свойством статической камеры является то, что она изменяет естественные потоки CO₂, внося изменения в концентрационные градиенты между почвой, растительностью и окружающим воздухом. Таким образом, факторы, управляющие потоками CO₂, не являются постоянными в течение времени экспозиции, поэтому можно ожидать нелинейную динамику возрастания или убывания концентрации CO₂ в камере. Тем не менее, для вычисления УП CO₂ во многих недавних и отчасти важных работах применяется линейная регрессия. Этот подход находит оправдание в том, что время экспозиции берется достаточно малым, а это должно обеспечить такое изменение концентрации, которое за указанное время все еще остается внутри интервала линейности. Однако авторы показали, что линейная регрессия часто не является подходящим методом при

определении УП CO₂ СКа методом даже при малом времени экспозиции. В связи с этим они развивают нелинейную (экспоненциальную) регрессионную модель, основанную на учете диффузии и фотосинтеза. Эта модель проверяется при измерениях на четырех исследовательских полигонах (всего выполнено 1764 измерения), три из которых находятся в Финляндии, а один – в сибирской тундре.

[Kutzbach et al., 2007a]. В арктической полигональной тундре на севере Восточной Сибири (в центре дельты р. Лена, 72° 22' с.ш., 126° 30' в.д.) методом МиВП в июле-октябре 2003 г. и в мае-июле 2004 г. измерялись УП CO₂. Период измерений включал в себя время таяния снега и оттаивания почвы, а также начало последующего ее замерзания. Регион исследований, характеризовавшийся полярным и отчетливо континентальным климатом, располагался в зоне распространения очень холодных многолетне-мерзлых пород с большим содержанием льда в них. Почвы ИП были олиготрофными, с высоким содержанием органического вещества, насыщенными водой. В растительном покрове доминировали осоки и мхи. Основные характеристики процессов газообмена CO₂ (GPP и R_{eco}) за фотосинтетически активный период (июнь-сентябрь) имели невысокие значения: GPP = -432 г·м⁻², R_{eco} = +327 г·м⁻². Однако дыхание экосистемы продолжалось с существенной интенсивностью и в течение осени, когда почва была еще в значительной степени незамерзшей, но фотосинтез прекращался. Вообще говоря, влажная полигональная тундра дельты р. Лена явилась существенным стоком CO₂ суммарной мощностью -119 г·м⁻² за летний сезон (или -71 г·м⁻² за весь год). Вклад мхов в GPP оценен в 40%. Суточная динамика GPP определялась, главным образом, приходящей фотосинтетически активной радиацией, но в полдень фотосинтетический аппарат растений часто оказывался в состоянии, близком к насыщению. Синоптические условия²¹ погоды сильно влияли на газообмен CO₂ путем изменений облачности, осадков и температуры воздуха. Динамика величины R_{eco} в течение лета наилучшим образом объяснялась при помощи экспоненциальной зависимости от яркостной температуры поверхности T_{sur} (но не от температуры почвы!), которая определялась через уходящее вверх инфракрасное излучение (L) по формуле²²: $T_{sur} = 65.1 \cdot L^{1/4}$. Авторы объясняют это важной ролью дыхания растений в балансе CO₂ тундровых экосистем.

[Maksyutov et al., 1995]. В работе приводятся результаты измерений атмосферных концентраций CH₄ и CO₂ в 1993-1994 гг. в 18 км к западу от г. Якутск на высотах 11, 44 и 77 м над уровнем почвы. УП определялись методом «гигантской камеры». В предположении того, что инверсионный слой простирался до высоты 300 м, получены следующие средние УП для темного времени суток: CH₄ – 0.37 мгС·м⁻²·час⁻¹; CO₂ – 370 мгС·м⁻²·час⁻¹.

[Maksyutov et al., 1997]. В работе приводятся результаты измерений атмосферной концентрации CO₂ в 1994-1996 гг. близ г. Якутск на высотах от 11 до 77 м над уровнем почвы. УП определялись методом «гигантской камеры», причем измерения в тех метеорологических условиях, когда слой инверсии существенно превышал максимальную высоту пробоотбора, отбрасывались. В предположении того, что инверсионный слой простирался до высоты 150 м, получено среднее значение УП для темного времени суток, равное 108 мгС·м⁻²·час⁻¹ (эта величина может рассматриваться в качестве интенсивности дыхания экосистемы).

[Maksyutov et al., 1999]. В работе приводятся данные измерений на Бакчарском болоте (Томская обл.) в 1994 г. удельных потоков CH₄ обычным камерным методом и методом «обратной задачи» (в последнем случае УП определялись по результатам измерений атмосферных концентраций CH₄ на высоте 5 м). УП, измеренные камерным методом, составили в среднем 5.2 мгС·м⁻²·час⁻¹ при стандартном отклонении 4.1 мгС·м⁻²·час⁻¹. Минимальная оценка среднего УП для темного времени суток, полученная методом «обратной задачи» составила 3.125 мгС·м⁻²·час⁻¹. Кроме того, построены регрессионные зависимости УП CH₄ от температуры почвы и потока тепла или просто от одной лишь температуры почвы.

[Maksyutov et al., 1999a; Maksyutov et al., 2001; Krasnov et al., 2010]. Разработана новая (по сравнению с использованной Nakano et al. [1998]) автоматическая система пробоотбора и количественного газового анализа для измерения УП CH₄ и CO₂ на болотных почвах. Количественный анализ CH₄ и CO₂ осуществлялся с использованием, соответственно, полупроводникового датчика и ИК-газоанализатора. Данная система применялась для измерения УП CH₄ на двух ИП, расположенных в типичном для юга Западной Сибири Бакчарском болотном комплексе близ п. Плотниково. Измерения выполнялись с мая по

²¹ Синоптические условия – те синоптические процессы, которые определяют собой то или иное атмосферное или вообще географическое явление (например, образование осадков, заморозки, вскрытие рек) [Хромов и Мамонтова, 1955].

²² Авторы не приводят размерностей используемых величин, вероятно, считая их хорошо известными. Действительно, поскольку данная формула следует из формулы Стефана-Больцмана, то необходимую размерность легко найти в литературе (см., например, [Белов и Афонин, 2005, с. 145]): если $[L] = \text{Вт}/\text{м}^2$, то $[T_{sur}] = \text{К}$.

октябрь²³ с 1998 по 2010 гг. На каждом полигоне изначально было установлено по 6 камер, функционирование которых обеспечивалось за счет энергии солнечных батарей. Первый полигон представлял собой открытую мезотрофную топь, второй – грядово-мочажинно-озерковый комплекс. Полученные для этих ИП средние за сезон²⁴ значения УП CH₄ составляли, соответственно, 12.7 и 2.1 мг·м⁻²·час⁻¹. На основе аэрофотоснимков высокого разрешения и наземных наблюдений для указанных ИП были построены карты растительности. Оказалось, что УП CH₄ и CO₂ определяются видовым составом доминирующей растительности и почвенными условиями. При этом краткосрочная динамика УП коррелировала с усредненной за 3 суток температурой почвы, однако в сезонном масштабе времени выявлено месячное запаздывание осеннего снижения эмиссии относительно снижения температуры. На грядово-мочажинном болоте УП CH₄ коррелировали с потреблением CO₂ растительностью (вычислявшимся по результатам дневных измерений суммарного УП CO₂ и ночных измерений дыхания).

[Maksyutov et al., 2001] – см. выше [Maksyutov et al., 1999a].

[Maksyutov et al., 2009]. В Сибири на 9 стационарных вышках и по маршрутам нескольких полетов были выполнены измерения атмосферных концентраций метана и диоксида углерода. Путем решения обратной задачи для модели атмосферного переноса проведен анализ данных за несколько лет измерений. Данный метод позволил уточнить сезонную динамику потоков в различных экосистемах. Правда, динамика CO₂ воспроизводилась транспортной моделью только для летних данных, а зимние наблюдения характеризовались большей изменчивостью, нежели та, которую давала модель. Для воспроизведения подробных временных рядов концентраций CH₄ и CO₂, измеренных на вышках, была применена Лагранжева транспортная модель высокого разрешения, позволившая существенно снизить расхождения (между результатами моделирования и наблюдения) в масштабах от недельного до менее чем суточного. Измеренные вертикальные профили метана оказались полезными для ограничения величин как летних, так и зимних эмиссий. Профили, полученные во время полетов над Западной Сибирью, сравнивались с расчетами по модели, учитывающей как перенос, так и химические реакции в атмосфере. Результаты расчетов, проведенных по модели, использующей в качестве граничного условия (потока метана на поверхности) величины из EDGAR/GISS, не выходили за границы погрешности измерений в районе Сургута, однако для юга Западной Сибири соответствие было не столь хорошим – измерения показали, что в реальности потоки на юге должны быть больше, нежели заложенные в EDGAR/GISS. На основе детальной карты болот и всех доступных экспериментальных данных, полученных в измерениях ручными и автоматическими камерами, была создана региональная карта эмиссии метана из болот, дававшая для юга более высокие величины потоков, нежели EDGAR/GISS. Использование указанной карты в качестве граничного условия модели привело к уменьшению невязки рассчитанных и наблюдаемых концентраций на юге.

[Maksyutov et al., 2010]. В работе описаны длительные (в летне-осенние сезоны 2007-2008 гг.) широкомасштабные²⁵ измерения УП CH₄ СКa методом на территории Западной Сибири, предпринятые в связи с тем, что ранее опубликованные различными авторами оценки потока CH₄ для этого региона варьировали в чрезвычайно широком диапазоне (от 2 до 22 МтCH₄·год⁻¹). Все разнообразие типов болот было представлено в виде комбинаций из 8 типов болотных микроландшафтов (палса, рям, гряда ГМК, эвтрофные болота, мезотрофные топи, олиготрофные мочажины, приозерные сплавины, внутриболотные озера). Исследования проводились на 30 ключевых участках в 7 природных зонах/подзонах Западной Сибири (тундра; лесотундра; северная, средняя и южная тайга, подтайга; лесостепь). Полученные результаты были генерализованы в виде пространственной модели эмиссии, основанной, во-первых, на электронной карте распространения болотных микроландшафтов, во-вторых, на величинах периода эмиссии для каждой зоны/подзоны и, в-третьих, на плотностях распределений вероятностей УП для каждого болотного микроландшафта каждой природной зоны/подзоны. Результатом данной работы явилась электронная карта

²³ Так указано в [Maksyutov et al., 2001; Krasnov et al., 2010]. В [Maksyutov et al., 1999a] рассматриваются лишь измерения 1998 г. и для них даны несколько иные даты: с 23.04 по 01.11. Скорее всего, в самом начале и в самом конце этого периода система работала неустойчиво, так что доверять следует только тем данным, которые получены с мая по октябрь, как и указано в [Maksyutov et al., 2001; Krasnov et al., 2010].

²⁴ Можно быть уверенным, что *величины удельных потоков относятся лишь к сезону 1998 г.*, хотя опубликованы они в обеих цитируемых работах (т.е. и в статье Maksyutov et al. [2001], в которой говорится об измерениях с мая по октябрь в 1998 и 1999 гг.). Наша уверенность основана на том, что такое удивительное совпадение – равенство УП на обоих исследовательских полигонах болота в два разных года – крайне маловероятно, но подчеркнем, что эти величины были опубликованы уже в [Maksyutov et al., 1999a], где рассматриваются лишь измерения 1998 г. (поскольку эта публикация вышла из печати в январе 1999 г., а новые экспериментальные данные в 1999 г. были получены лишь, как мы помним, в мае-октябре).

²⁵ Maksyutov et al. [2010] пишут, что было сделано «более 1500 измерений». Хотя это абсолютно верно, но, тем не менее, может ввести читателя в заблуждение относительно масштабов проведенной работы, поскольку измерений было выполнено 1899. В такой ситуации, на наш взгляд, авторам лучше было бы сказать не «более 1500 измерений», а «почти 1900 измерений».

эмиссии метана с разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Было обнаружено, что палсы, рямы и гряды характеризуются самыми низкими УП (1-е/2-е/3-и квартили для них составили, соответственно, $-0.04/0.00/0.04$, $0.00/0.04/0.28$ и $0.00/0.09/0.37$ $\text{мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$). Существенно большие УП отмечались в приозерных сплавинах ($2.74/4.65/6.11$ $\text{мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$), а также в мезотрофных и эвтрофных болотах (вместе они характеризовались следующими квартилями УП: $1.15/3.35/6.21$ $\text{мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$). Максимальные УП, иногда достигавшие сотен $\text{мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, наблюдались в неглубоких внутриболотных озерах. На основании проведенных исследований авторы оценивают суммарную эмиссию СН_4 с болот Западной Сибири величиной 3.21 $\text{МтСН}_4 \cdot \text{год}^{-1}$ и приходят к выводу, что наиболее существенными региональными источниками метана (обуславливающими около 50% этой величины) являются олиготрофные мочажины, внутриболотные озера и эвтрофные болота южной тайги, а также олиготрофные мочажины средней тайги.

[Morishita et al., 2001]. В июле 2000 г. вблизи г. Якутск ($62^\circ 05'$ с.ш., $129^\circ 45'$ в.д.) при помощи камерного метода проводились измерения удельных потоков СН_4 из почв лесов, лугов и болот (аласов). Установлено, что метан потреблялся почвами лесов, в т.ч. и после пожаров, но выделялся из аласов и почв лугов. Особенно большие УП СН_4 наблюдались у уреза воды в аласах. Аласы образовывались на местах лесных пожаров. В процессе высыхания аласов могла наблюдаться значительная эмиссия СН_4 . Полученные в данной работе величины УП потребления и эмиссии СН_4 близки к ранее опубликованным значениям (в работе приводятся также многочисленные данные других авторов).

[Nakano et al., 1998]. В работе приводятся результаты измерений удельных потоков СО_2 и СН_4 на Бакчарском болоте (Томская обл.) в августе-октябре 1997 г. камерным методом. Особенностью измерений было то, что они выполнялись при помощи полностью автоматической системы (был автоматизирован и пробоотбор и газовый анализ). К сожалению оказалось, что датчик для измерения концентрации метана сильно подвержен влиянию температуры и влажности, поэтому для СН_4 в работе обсуждаются только данные ночных измерений УП. Параллельно с измерениями потоков велись измерения температуры почвы, однако корреляция между УП и температурой оказалась довольно слабой.

[Nakano et al., 2000]. В работе приводятся результаты измерений удельных потоков СН_4 и факторов внешней среды в Сибири в зоне распространения многолетнемерзлых пород летом 1993 и 1995 гг. статическим камерным методом. В каждом районе измерения выполнялись на двух участках: покрытых водой болотах и относительно сухих лугах. Средние УП метана на покрытых водой исследовательских полигонах составили 1.9292 $\text{мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ (Тикси, 71.5° с.ш., 130° в.д.) и 11.7125 $\text{мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ (Черский, 68.5° с.ш., 161.4° в.д.), причем на них была выявлена суточная и внутрисезонная изменчивость, в отличие от относительно сухих исследовательских полигонов (впрочем, там УП были близки к нулевым, а часто – отрицательными в обоих вышеуказанных районах). Результаты исследования позволяют предположить, что динамика УП СН_4 на покрытых водой болотах в зоне распространения многолетнемерзлых пород определяется температурным режимом сезонно-талого слоя. Суточная динамика УП коррелирует с температурой почвы на глубине 10-30 см. Для летнего сезона выявлена совершенно четкая корреляция УП с «сантиметрами-градусами», т.е. с произведением температуры почвы на глубину протаивания. Этот параметр представляется хорошей независимой переменной для эмпирического моделирования эмиссии метана из болот в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

[Nakayama, 1995; Nakayama and Akiyama, 1994]. Исследования проводились на небольшом (7×0.5 км^2) острове Муостаах (авторы записывают его название как «Mustakh»), расположенном недалеко от Тикси (респ. Саха-Якутия) на широте 71.5° с.ш. Остров находится в зоне распространения многолетне-мерзлых пород и покрыт тундровой растительностью. УП метана измерялись на двух исследовательских полигонах: первый («А»), покрытый осокой, был очень влажным (вода стояла почти у поверхности), второй («В») был покрыт мхами, а вода стояла на глубине 20 см. Измерения УП проводились камерным методом, кроме того в автоматическом режиме измерялись метеорологические параметры (температура воздуха, скорость ветра, интенсивность солнечной радиации и профиль температуры почвы). В течение периода наблюдений среднесуточная температура воздуха колебалась от -0.3 до 10.9 $^\circ\text{C}$, а среднесуточная температура талого слоя почвы – от 0.5 до 5.3 $^\circ\text{C}$. На полигоне «А» УП измерялись в течение месяца почти ежедневно и варьировали от 0.6625 до 3.1792 $\text{мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Найдена корреляция ($R^2 = 0.7$) УП метана с произведением глубины слоя протаивания на среднюю дневную температуру почвы.

[Nakayama and Akiyama, 1994] – см. выше [Nakayama, 1995].

[Nakayama et al., 1994]. Исследования проводились в июле-августе на аласах в окрестностях г. Якутск (респ. Саха-Якутия) на широте 62° с.ш. в зоне тайги (на многолетне-мерзлых породах). Выделение метана почти не наблюдалось из тех аласов, в которых была повышенная концентрация сульфатов, обусловленная сельскохозяйственной деятельностью человека. Средний УП метана с открытой водной поверхности остальных аласов составил 10.9875 $\text{мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, со следующих далее их сплавинов – 14.3792 $\text{мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, а с периферийной сухой части – 1.9917 $\text{мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. УП с заболоченной части между сплавиной и

периферией аласа различались для аласов с крупными и мелкими озерами и (в среднем) составили, соответственно, 9.4958 и 32.1125 мгСН₄·м⁻²·час⁻¹.

[*Naumov, 2001*]. В полевых измерениях (именно на Бакчарском болоте) при естественном освещении обнаружена убыль концентрации метана в прозрачной камере, тогда как в непрозрачной камере концентрация возрастала, т.е. под воздействием освещения происходило переключение с эмиссии на потребление метана²⁶. При этом в различных местообитаниях наблюдалась достаточно сильная корреляция между скоростью эмиссии метана в темноте (X, мгСН₄·м⁻²·час⁻¹) и скоростью его поглощения на свету (Y, мгСН₄·м⁻²·час⁻¹). Была получена простая линейная связь между этими переменными²⁷: Y=1.346·X; корреляционное отношение²⁸ составило 0.78 при 89 парах экспериментальных значений.

[*Naumov et al., 2007*]. В двух биоклиматических подзонах севера Западной Сибири проводилось изучение эмиссии СО₂ и СН₄. Трехлетние измерения дали следующие значения средних удельных потоков с болот средней тайги в летний сезон: 3.4 ± 2.9208 мгСН₄·м⁻²·час⁻¹ и 315 ± 176.25 мгСО₂·м⁻²·час⁻¹ (усреднение проводилось по 190 и 156 измерениям, соответственно). Измерения в июле-августе 2005 г. дали значения средних удельных потоков в лесотундре от 0.2542 мгСН₄·м⁻²·час⁻¹ и 62.5 мгСО₂·м⁻²·час⁻¹ для озер до 1.7083 мгСН₄·м⁻²·час⁻¹ для олиготрофных мочажин и 225 мгСО₂·м⁻²·час⁻¹ для поверхности бугров пучения (в плоскобугристых болотах). Также изучалось влияние температуры торфа и уровня стояния воды на УП СО₂ и СН₄. При этом для болот средней тайги была обнаружена статистически достоверная экспоненциальная зависимость между УП СН₄ и уровнем стояния воды.

[*Panikov, 1994*]. При помощи метода статических камер измерялись удельные потоки СН₄ и СО₂ в типичных болотных ландшафтах Европейской части России (Московская обл., Тверская обл., Сыктывкар, Полярный Урал) и в Сибири (Колыма, Васюганье, Томская обл.). В зависимости от значений факторов внешней среды УП СН₄ варьировали от -0.8333 до 100 мгСН₄·час⁻¹·м⁻². Была обнаружена положительная корреляция УП с температурой и рН почвы, уровнем стояния воды, хотя соответствующие коэффициенты корреляции были, по большей части, малы. По результатам измерений в различных точках болот построены вероятностные распределения УП СО₂ (в темноте) и СН₄, оказавшиеся, соответственно, нормальным и лог-нормальным. Обмен СО₂ регулировался, главным образом, растениями (закономерной суточной динамикой фотосинтеза и ее изменениями в большем масштабе времени). Эмиссия СН₄ не была напрямую связана с физиологическим состоянием растительного сообщества, а определяющими ее основными факторами были: окислительно-восстановительный потенциал среды и интенсивность транспорта сосудистыми растениями. Наиболее уязвимым компонентом цикла метана оказались метанотрофные бактерии. Наибольшие средние УП СН₄ (9.75 мгСН₄·час⁻¹·м⁻² при стандартном отклонении 13.5833 мгСН₄·час⁻¹·м⁻²) получены на Васюганской низменности (Западная Сибирь).

[*Panikov, 1999*]. Обзор освещает некоторые аспекты усилий международного научного сообщества по

- измерению эмиссии парниковых газов из северных болот (в частности, приводятся литературные данные по измерениям зимних УП СО₂ и СН₄ в Западной Сибири и на Колыме);

²⁶ Этот результат представляется нам весьма сомнительным, поскольку получен он на Бакчарском болоте, где под руководством проф. Г. Иноуе постоянно ведется измерение эмиссии метана с помощью (прозрачных) автоматических камер. Потоки, измеренные автоматизированной системой всегда были положительны, т.е. при любом уровне освещенности наблюдалась эмиссия метана, а не его поглощение почвой. К сожалению, группа проф. Иноуэ опубликовала результаты автоматического измерения потока не за все годы, и как раз за 2000 г. данные отсутствуют, так что нельзя полностью быть уверенным, что и в 2000 г. потоки на свету были положительными. Но, с другой стороны, если бы такой уникальный результат был получен (уникальный на фоне всей опубликованной информации за другие годы), то это где-то промелькнуло бы. Но не японские участники проекта, ни русские инженеры, обслуживающие систему, такого никогда не припомнили.

²⁷ Из регрессионного уравнения видно, что на свету поглощение метана было почти на 35% больше, чем эмиссия метана в темноте. По нашему мнению, это противоречит самым общим соображениям. Действительно, если бы на свету поглощение метана превышало (тем более столь существенно) эмиссию в темноте, то, учитывая, что летом продолжительность дня значительно больше ночи, а зимняя эмиссия метана практически отсутствует, мы получили бы, что болота должны быть не источниками, а стоками метана! Но (даже не говоря о всей мировой научной литературе, посвященной проблеме метана как парникового газа) в прочих работах самого А.В. Наумова болота характеризуются именно как источники, а не стоки метана (см., например, [Наумов, 1999; 2000; 2003]). Веря, что обнаруженный эффект не является артефактом, а действительно существует, Naumov [2001] пытался дать ему разумное объяснение, но, к сожалению, не преуспел в этом. Поскольку здесь мы ограничены узкой тематикой эмиссии парниковых газов из болотных почв, то не можем отвлекаться на вышеуказанное микробиологическое объяснение и его конструктивную критику, а отошлем заинтересованного читателя к диссертации М.В. Глаголева [2010а: с. 100-103], где дано как подробное изложение позиции А.В. Наумова, так и ее критика.

²⁸ А.В. Наумов (в [Naumov, 2001]) ошибочно использовал термин «корреляционное отношение» («correlation ratio»), что, во-первых, несколько странно, поскольку этот термин использует при анализе нелинейных корреляционных связей, а в случае линейных функций (к коим и относится Y=1.346·X) обычно говорят о коэффициенте корреляции; во-вторых, корреляционных отношений будет два: $\eta^2_{Y|X}$ и $\eta^2_{X|Y}$ [Румшицкий, 1971], поэтому следовало бы указать – о каком из них идет речь.

- ее моделированию;
- выявлению факторов внешней среды, влияющих на эту эмиссию;
- исследованию отклика болот (в частности – в отношении эмиссии газов) на глобальное изменение климата.

[Panikov and Dedysh, 2000]. Для середины февраля значение потоков CH_4 и CO_2 , осредненные по пространству \pm стандартное отклонение составили $0.16 \pm 0.12 \text{ мгС} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ (или $5.03 \pm 3.72 \text{ мгCH}_4 \cdot \text{сут}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$)²⁹ и $2.875 \pm 2.1667 \text{ мгCO}_2 \cdot \text{сут}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, соответственно. При этом эмиссия возрастала при движении от периферии болота к его центру. Доля метана, поступающего в атмосферу из болота в холодный сезон, в зависимости от способа расчета составляет от 3.5 до 11% от общего потока CH_4 . Это отчасти совпадает с результатами, полученными для Аляски и севера Миннесоты. В статье также приведены данные для среднего потока метана из Бакчарского болота в июле-августе 1995 г. ($19.375 \text{ мгCH}_4 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ при среднемесячной температуре 21.3°C для слоя почвы 0-10 см)³⁰. В июле 1996 г. средний УП метана из Бакчарского болота составил $10.283 \text{ мгCH}_4 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ при среднемесячной температуре 19.7°C для слоя почвы 0-10 см. В июле-августе 1997 г. – $5.7083 \text{ мгCH}_4 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ (при средней температуре для слоя почвы 0-10 см, равной 13.8°C)³¹.

[Panikov et al., 1997]. На трансекте, проходящей через 7 растительных сообществ торфяного (сфагнового) болота, была исследована динамика эмиссии CH_4 при помощи метода статических камер (всего вдоль трансекты размещалось 12 камер). Эмиссия CH_4 обнаруживала корреляцию ($r = -0.5385$) с живой биомассой и изменялась в широких пределах от -6 до $100 \text{ мгС} \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. Наибольшая эмиссия ($17.7 \pm 15.2 \text{ мгС} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) была обнаружена на участках, занятых осоково-сфагновым сообществом. Наименьшая ($2.3 \pm 1.7 \text{ мгС} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) – в периферийной части болота, занятой невысокими соснами. На основе проведенных измерений и карты растительности были оценены средне-взвешенный (с учетом распространенности тех или иных растительных сообществ) и средний (без такого учета) удельные потоки метана, которые для изученного участка болота составили, соответственно, 12.4 ± 1.3 и $14.1 \pm 13.8 \text{ мгС} \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$.

[Panikov et al., 2001]. Статья посвящена биологическим механизмам, обуславливающим эмиссию CH_4 из болот. Исследования проводились в пределах 200-м катены, заложенной на Бакчарском болоте (Бакчарский р-н Томской обл.). Совместное использование общепринятого статического камерного метода и метода измерения актуальной скорости образования метана в почвенном профиле, описанного в [Glagolev, 1998; Glagolev et al., 1998], позволило связать наблюдаемую эмиссию метана с его образованием и поглощением в почве. В полевых исследованиях было установлено, что продукция метана являлась относительно постоянной ($9-12 \text{ мгС} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$), а сильно варьирующая эмиссия ($0.2-20 \text{ мгС} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) тесно коррелировала ($r = -0.809$) с потреблением метана. В лабораторных экспериментах было установлено, что потребление метана описывалось кинетикой Михаэлиса-Ментен. Хлориды и нитраты (независимо от природы катионов) оказались неконкурентными ингибиторами окисления метана ($K_i \sim 0.5 \text{ мМ}$). Образование метана было нестабильным и в анаэробных условиях оно (наряду с образованием CO_2 и H_2) обнаруживало длительные колебания с периодом порядка недели. На основании проведенного исследования авторы пришли к выводу, что одно лишь влияние факторов внешней среды не может объяснить изменение эмиссии, которая в значительной степени подвержена метаболическому контролю со стороны соответствующих почвенных организмов.

[Peregon et al., 2008]. Построена электронная карта болот путем оцифровки «Типологической карты болот Западно-Сибирской равнины» (1 : 2 500 000), учитывавшей 20 типов болот или болотных комплексов. В дальнейшем для улучшения детальности пространственной структуры болотных комплексов, широко

²⁹ Мы приводим именно те значения, которые были опубликованы в [Panikov and Dedysh, 2000], хотя, на наш взгляд, они слегка противоречат друг другу. Действительно, пересчет от $\text{мгС} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ к $\text{мгCH}_4 \cdot \text{сут}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ осуществляется весьма просто. Необходимо величину потока, выраженную в $\text{мгС} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, сначала умножить на коэффициент $16/12 \text{ мгCH}_4/\text{мгС}$, представляющий собой отношение молекулярной массы метана к атомной массе углерода (так мы получим поток в $\text{мгCH}_4 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$), а потом домножить результат на количество часов в сутках), т.е. на 24 час/сут . Объединяя оба коэффициента, получаем пересчетный множитель $32 \text{ час} \cdot \text{мгCH}_4 \cdot \text{мгС}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$. Но $(0.16 \pm 0.12 \text{ мгС} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}) \cdot 32 \text{ час} \cdot \text{мгCH}_4 \cdot \text{мгС}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1} = 5.12 \pm 3.84 \text{ мгCH}_4 \cdot \text{сут}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, а не $5.03 \pm 3.72 \text{ мгCH}_4 \cdot \text{сут}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, как это приводится в [Panikov and Dedysh, 2000].

³⁰ По нашему мнению, доверять такому высокому значению температуры нельзя. Оно входит в противоречие с данными из [Glagolev, 1998], но именно автор последней работы непосредственно занимался измерениями температуры в июле-августе 1995-1997 гг. на Бакчарском болоте в составе совместных Российско-Японских экспедиций (в которых участвовал и Н.С. Паников, использующий полученные температурные данные в своей статье). Правда, на первый взгляд температура, приведенная Panikov and Dedysh [2000] близка к измеренной в работе [Glagolev, 1998]. Однако первая отнесена к слою почвы 0-10 см, а вторая – к поверхности почвы (температура слоя 0-10 см в последнем случае была ниже).

³¹ Если говорить не о поверхности почвы, а именно о слое 0-10 см, то такое значение вновь представляется завышенным, однако заметить это весьма трудно, поскольку, к сожалению, в работах [Glagolev, 1998; Glagolev et al., 1998] уму непостижимым образом вкралась досадная опечатка: в качестве средней (за июль-август 1997 г.) температуры поверхности почвы, которая на самом деле составляла 13.9°C , указана средняя температура воздуха (16.0°C).

распространенных в бореальной зоне Западной Сибири, оцифрованная карта уточнялась с использованием спутниковых снимков среднего пространственного разрешения (LANDSAT TM, ETM+). Для этой цели (в соответствии с климатическим градиентом распространения главнейших типов болот) было выбрано пять ключевых участков площадью от 5000 до 7000 км². На основе полевых измерений эмиссии CH₄, и доступных литературных данных была создана база данных, охватывавшая удельные потоки метана в различных болотных микроландшафтах (грядках, мочажинах, мерзлых буграх и т.д.). Доли, которые составляли площади этих микроландшафтов в болотных комплексах, оценивались при помощи спутниковых снимков высокого разрешения. На основе созданной электронной карты была получена региональная оценка эмиссии метана.

[Petrescu et al., 2008]. В работе сравниваются удельные потоки 2004-2006 гг. на 2 арктических болотных участках в различных температурных условиях. Для имитации эмиссий была использована модель PEATLAND-VU, в которой модуль, описывающий поведение CH₄, основан на модели Walter-Heimann. Один из участков – Ресурсный Резерват «Кыталык» (70° с.ш., 147° в.д.) – расположен в России. Он находится в зоне распространения многолетне-мерзлых пород (при среднегодовой температуре -14.3 °С) в Яно-Индибирской низменности на севере Восточной Сибири (другой участок – на севере Швеции в 10 км восточнее Абиско). Полевые измерения УП в Ресурсном Резервате «Кыталык» производились статическим камерным методом во время коротких (несколько дней) экспедиций. УП CH₄ оказались в интервале от 0 до 20.8 мг·м⁻²·час⁻¹, среднее (за 3 года) значение составило 1.29 мг·м⁻²·час⁻¹.

[Postnov et al., 1994]. В работе представлена пространственно-временная динамика турбулентного потока метана в атмосферном пограничном слое над различными типами поверхности в ХМАО. В связи с малой доступностью этой публикации для современных исследователей, основные данные из нее процитированы в [Глаголев и Суворов, 2007; Глаголев с соавт., 2007].

[Repo et al., 2007]. Летом 2005 г. с использованием плавающих камер измерены УП CH₄ и CO₂ из 3 небольших внутриболотных озер в средней тайге и лесотундре Западной Сибири. Экспериментальные данные обрабатывались на основе модели тонкого пограничного слоя, дающей связь между газообменом и скоростью ветра. Вода всех изученных озер оказалась перенасыщена CH₄ и CO₂. Поэтому в сезонном цикле озера являются источниками, поставляющими эти парниковые газы в атмосферу. Измеренные камерами среднесуточные УП CO₂ варьируют от 0 до 3.1 гCO₂·м⁻²·сут⁻¹, а УП CH₄ – от 1.1 до 120 гCH₄·м⁻²·сут⁻¹. В двух озерах был измерен пузырьковый УП CH₄ (0.65–11 гCH₄·м⁻²·сут⁻¹). Поток углерода за активный сезон составил 23–66 гС·м⁻², причем > 90% этой величины составил углерод CO₂.

[Rozanov, 1995, с. 12, 14, 24-25, 33-34]. Вообще говоря, обзор посвящен эмиссии CH₄ из лесов и сельскохозяйственных угодий России. Но автором цитируются и многочисленные литературные данные по эмиссии CH₄ из болот.

[Sachs et al., 2008; Sachs et al., 2008a]. Представлены данные измерений УП CH₄ методом «eddy covariance» в экосистемах тундры севера Сибири (на юге центральной части дельты р. Лена: 72° 22' с.ш., 126° 30' в.д.) с начала июня до конца сентября 2006 г. – в течение всего бесснежного периода от весеннего снеготаяния до начала повторного замерзания почвы. Кроме того, с июля по сентябрь ежедневно на 15 участках, расположенных в центрах 4 полигонов и на валиках проводились измерения СКа методом. Исследовательский полигон находился в зоне непрерывного распространения многолетне-мерзлых пород и характеризовался арктическим континентальным климатом с очень низкой суммой осадков и среднегодовой температурой воздуха -14.7 °С. Удельные потоки метана оказались относительно небольшими со средним значением 0.7792 ± 0.425 мг·м⁻²·час⁻¹, что авторы объясняют, во-первых, экстремально низкой температурой многолетне-мерзлых пород; во-вторых, лимитированием метаногенных архей питательными субстратами; и, в-третьих, относительно высокой долей незатопленной умеренно влажной поверхности. На высоте 4 м система «eddy covariance» измеряла также турбулентность приземного слоя, которая оказалась главным фактором, определяющим величину эмиссии CH₄ – она объясняла около 60% вариабельности эмиссии, в то время как температура почвы – только 8%. Экспоненциальную модель, учитывающую зависимость УП от турбулентности приземного слоя и температуры почвы, значительно улучшал учет атмосферного давления. Снижение атмосферного давления и турбулентности в приземном слое над почвой, покрытой водой, вызывало пузырьковый вынос метана. Тесная взаимосвязь УП CH₄ и атмосферных параметров, продемонстрированная в данном исследовании, порождает вопросы относительно достоверности результатов камерного метода.

[Shimoyama et al., 2000]. На типичном для южной тайги Западной Сибири мезотрофном Бакчарском болоте с 20.04 по 21.07.1998 г. и с 7.04 по 25.11.1999 г. измерялись удельные потоки CO₂ (микрометеорологическими методами) и метеорологические параметры. Выявлена взаимосвязь между температурой воздуха (T_{air} , °С) и ночным УП CO₂ (R , мгCO₂·м⁻²·с⁻¹), по физическому смыслу представляющим собой дыхание: $R = 0.0202 \cdot \exp(0.0836 \cdot T_{air})$. Максимальное дыхание (≈ 15 гCO₂·м⁻²·сут⁻¹) наблюдалось в середине июля. По результатам дневных и ночных определений УП CO₂ вычислены NPP, NEP и GPP. Оказалось, что 3 месяца (с начала июня по начало сентября) NEP < 0, т.е. болото работает как

сток CO_2 . В другие сезоны величина NEP составляет от 0 до $5 \text{ гCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. С начала мая по начало сентября $\text{GPP} < 0$ (причем в начале июля $\text{GPP} \approx 15 \text{ гCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$), а в остальное время $\text{GPP} \approx 0$.

[Schneider et al., 2009]. В работе сделана попытка масштабирования измерений эмиссии CH_4 – перехода от небольших исследовательских полигонов на отдельных болотах к территории всей дельты р. Лена (самой большой арктической дельты, занимающей площадь $29\,000 \text{ км}^2$) на основе спутниковых снимков Landsat 7 ETM+. На снимке выделялись 9 типов поверхности: WT – влажная тундра с доминированием осок и мхов (wet, sedge- and moss-dominated tundra); MT – менее влажная тундра с доминированием трав и мхов (moist grass- and moss-dominated tundra); MDD – менее влажная либо сухая тундра с доминированием кустарничков (moist to dry dwarf shrub-dominated tundra); DMSD – сухая тундра с доминированием мхов, трав и кустарничков (dry moss-, sedge- and dwarf shrub-dominated tundra); DG – сухая тундра с доминированием трав (dry grass-dominated tundra); DT – сухая кочковатая тундра с доминированием трав (dry tussock tundra); NV – участки, почти лишенные растительности (mainly non-vegetated areas); SW – мелководья (shallow water); WB – более глубокие воды (water bodies). Эмиссия с территории дельты р. Лена, оценивалась на основе объединения результатов наземных измерений УП CH_4 (при этом некоторые вышеприведенные типы поверхности делились на подклассы по существенно различной эмиссии, например, SW подразделялись на покрытые растительностью берега и отмели озер, которым приписывались УП, равные $1.6792 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, и речные отмели с нулевой эмиссией. С использованием описанной методологии для территории всей дельты р. Лена получено среднее значение УП CH_4 $0.4312 \text{ мгCH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$.

[Schulze et al., 2002]. На верховом болоте, расположенном в 30 км от р. Енисей близ пос. Зотино ($60^\circ 45'$ с.ш., $89^\circ 23'$ в.д.) в подзоне средней тайги Западной Сибири определялась величина NEP. При этом использовались два подхода: измерение слоя торфа накопившегося выше гипокотилей сосен и метод МиВП. Первый метод дал величину NEP, равную $0.84 \text{ тC} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, второй (СреЗ за три сезона) – $0.43\text{--}0.62 \text{ тC} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Для окружающих лесов значение NEP было равно $0.6 \pm 1.1 \text{ тC} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Таким образом, интенсивность стока углерода, обеспечиваемая верховыми болотами, сравнима с той, которая характерна для леса, однако при оценках регионального цикла углерода необходимо учитывать эмиссию метана и вынос растворенного органического углерода.

[Sirin et al., 2008; 2009; 2010]. Многие торфяники, которые ранее были осушены для сельскохозяйственного использования или добычи торфа, в течение последних десятилетий оказались заброшены (в Европе это особенно характерно для восточной ее части). В одной лишь Европейской части России несколько миллионов гектар торфяников было преобразовано для сельскохозяйственного использования и добычи торфа путем прямого понижения уровня болотных вод, однако в наши дни эти торфяники не используются по экономическим причинам. Это составляет одну из наиболее серьезных проблем использования торфяников в данных регионах, которая срочно нуждается в решении, причем в решении весьма продуманном, поскольку указанная проблема тесно связана с окружающей средой, населением и экономикой. Осушение для сельскохозяйственного использования ведет к развитию процессов окисления, следствием которых является значительная эмиссия в атмосферу таких парниковых газов, как CO_2 и (в некоторых случаях) окись азота. Происходящая в результате этого деградация торфяников оказывает (вместе с торфяными пожарами) наиболее существенное отрицательное влияние на изменение климата. Кроме этого, даже осушенные торфяники могут выделять некоторое количество метана. Влияние осушения (и последующего хозяйственного использования) на эмиссию CO_2 и CH_4 изучалось в осенне-летние периоды в Томской обл. (Западная Сибирь), начиная с 2003 г. Измерения проводились при помощи камерного метода на торфяниках, осушенных под

- выращивание сельскохозяйственных культур (в настоящее время эти торфяники частично находятся под паром);
- участки добычи торфа (в настоящее время заброшенных или используемых для выращивания саженцев леса, а также как сенокос или пастбище).

Для сравнения аналогичные измерения проводились на широком спектре неосушенных болот – олиготрофных, мезотрофных и эвтрофных, а также на горях разных стадий восстановления. Статистический анализ данных, полученных в большом числе мест исследования, показал более высокую эмиссию CO_2 из осушенных торфяников в сравнении с естественными. В то же время, некоторые осушенные торфяники демонстрировали значительную эмиссию CH_4 , усиленную интенсивным потоком метана из осушительных каналов. Полученные данные были подтверждены исследованиями, проводимыми с 2005 г. на осушенных торфяниках Московской области (Европейская часть России), которые использовались для добычи торфа и в качестве сенокосных угодий. Здесь незначительная эмиссия метана наблюдалась с поверхности торфяника между осушительными каналами на участке фрезерной добычи торфа и на участке, который используется под сенокос после частичного удаления торфа. В условиях повышенной температуры и влажности метан выделялся даже из буртов торфа. Микробиологический анализ показал, что генетическое разнообразие

метаногенов на участке добычи торфа было не меньше, а на сенокосном участке – почти вдвое больше в сравнении с нетронутым болотом. Авторы предполагают, что поступление свежего органического вещества для образования CH_4 обеспечивает хорошо развитая корневая система растений. Для проверки этой гипотезы были поставлены два лабораторных эксперимента с микрокосмами (голый торф, заселение торфа травами и развитое травяное сообщество на торфе), моделирующими три стадии сукцессии. Эти эксперименты различались тем, что в одном из них влажность постоянно поддерживалась на высоком уровне, а в другом – варьировала. Эмиссия метана из сосудов с развитым травяным сообществом была выше, чем в двух других указанных выше случаях. При поддержании высокой влажности эмиссия метана была на 1-2 порядка выше, чем в условиях переменной влажности. На основании этих экспериментов авторы делают вывод о том, что органическое вещество растений может стать дополнительным источником метана после затопления торфяников (такое затопление необходимо осуществлять при выведении их из сельскохозяйственного использования). Для сокращения эмиссии можно перед затоплением производить удаление верхнего слоя торфа. Авторы считают, что этот прием может дать положительный эффект еще и потому, что поверхность болота окажется ближе к уровню воды, а это создаст более благоприятные условия развития для болотных видов растений.

[*Sirin et al., 2009*] – см. выше [Sirin et al., 2008].

[*Sirin et al., 2010*] – см. выше [Sirin et al., 2008].

[*Sirin et al., 2009a*]. Данная публикация представляет собой тезисы доклада в котором давались общие оценки эмиссии и географическое распределение осушенных болот, в настоящее время используемых под сельскохозяйственную деятельность, гидроресомелиорацию или для добычи торфа, а также болот использовавшихся в хозяйственной деятельности ранее, но ныне заброшенных. Потоки парниковых газов на поверхности болот, измененных в результате хозяйственной деятельности, измерялись в специально организованных исследованиях 2004-2008 гг. на ИП, расположенных в центральной части Европейской России и на территории Западной Сибири. Исследования охватывали широкое разнообразие как естественных болот (в качестве «контроля»), так и измененных в результате хозяйственной деятельности.

[*Slobodkin et al., 1993*]. Изучались скорости микробного образования и потребления CH_4 в болотных комплексах тундры и средней тайги. Для метана болотные почвы служат естественными биофильтрами. Метан из глубоких слоев обводненных мочажин эффективно потребляется как в верхних слоях того же местообитания, так и расположенными поблизости более сухими почвами. Метан потребляется как почвами с нейтральным рН, так и сфагновыми болотами с рН 4.2, что показывает присутствие соответствующей метанотрофной микрофлоры. Образование метана под уровнем стояния воды обусловлено активностью психрофильного метаногенного сообщества. Интенсивности эмиссии метана из болотных почв в атмосферу составляли $0.28-7.85 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ для тундры и $0.03-4.23 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ для средней тайги³².

[*Styles et al., 2002*]. С использованием интегральных свойств пограничного слоя, позволяющих определить влияние процессов обмена между подстилающей поверхностью и атмосферой, были получены оценки величин потоков МГС и их изотопного состава, изменяющегося в результате жизнедеятельности растений. В пределах и выше атмосферного пограничного слоя над покрытым растительностью районом центральной Сибири близ пос. Зотино (61° с.ш., 89° в.д.) в 1998 г. было предпринято пять полетов: 23.07 – в 14:00, 21:00 и 24.07 – в 08:00, 14:00, 19:00. Во время каждого полета регистрировались вертикальные профили температуры, давления, концентраций CO_2 и H_2O . Для анализа изотопного состава углерода и кислорода на различных высотах отбирались пробы воздуха. Оценки потоков сравнивались с наземными измерениями, осуществлявшимися при помощи метода “eddy covariance”. Метеорологические вышки для “eddy covariance” размещались на исследовательских полигонах, отражающих два доминирующих типа экосистем: одна – в лесу, другая – на болоте.

[*Takakai et al., 2006*]. В лесо-аласной экосистеме ($62^\circ 19'$ с.ш., $129^\circ 30'$ в.д.) близ г. Якутск с июня по сентябрь статическим камерным методом измерялись удельные потоки CO_2 , CH_4 и N_2O . Показано, что аласы Сибири являются источником парниковых газов. Лишь участки по краю озер (находящихся в центре аласов) были способны накапливать углерод. Однако и эти участки все равно являются источниками CH_4 и N_2O . Сами внутриаласные озера также были непрерывными источниками CH_4 . Полученные результаты позволили авторам предположить, что замещение лесных экосистем аласами может изменить баланс парниковых газов – сток превратится в источник. Этот баланс регулируется гидрологическим режимом почвы и в особой степени – затоплением, обусловленным распространением воды озер.

³² К сожалению, в [Slobodkin et al., 1993] допущена ошибка: в Аннотации статьи данные числа имеют размерность $\text{мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, тогда как в самой статье те же самые числа имеют размерность $\text{мгС} \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ (что будет в 16/12 раза больше при пересчете на $\text{мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$). Мы выбрали последний вариант ($\text{мгС} \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, или более кратко: $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$) поскольку в статье еще даны эмиссии в $\text{мкмольСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, численно соответствующие именно тем величинам, которые были приведены в $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$.

[Takeuchi et al., 2000]. В работе сделана попытка масштабирования измерений эмиссии CH_4 – перехода от небольших исследовательских полигонов на отдельных болотах к территории, охватываемой спутниковым снимком SPOT/HRV. На снимке выделялось 4 типа поверхности: лес, почва и два типа болот (обозначаемых авторами Bog1 и Bog2 без указания того, чему эти обозначения соответствуют по биологическому смыслу). Для леса и почвы принимались нулевые величины УП CH_4 . Для Bog1 принималось Cpe3 УП, равное $4.9167 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$, а для Bog2 $6.9167 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$.

[Takeuchi et al., 2002]. В работе сделана попытка масштабирования измерений эмиссии CH_4 – перехода от небольших исследовательских полигонов на отдельных болотах к территории, охватываемой спутниковым снимком ASTER вокруг г. Ноябрьск. На снимке выделялось 6 типов поверхности³³: березовые и сосновые леса, открытая водная поверхность, голая почва и два типа болот (верховые болота и палса). Для большинства типов поверхности принимались нулевые величины УП CH_4 , за исключением верховых болот и открытой водной поверхности (для них УП были равны, соответственно, 5.246 и $1.081 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$)³⁴.

[Takeuchi et al., 2003; Tamura and Yasuoka, 1999]. В работах сделана попытка масштабирования измерений эмиссии CH_4 – перехода от небольших исследовательских полигонов на отдельных болотах к территории, охватываемой спутниковым снимком SPOT/HRV. На снимке выделялось 8 типов поверхности: березовые и хвойные леса, открытая водная поверхность, поля, голая почва и три типа болот (bog_1: густой рям; bog_2: разреженный рям; bog_3: безлесные торфяные топи, главным образом осоковые и пушицевые). Эмиссия с территории, охватываемой спутниковым снимком, оценивалась на основе объединения результатов наземных измерений УП CH_4 (полученных в июле-августе 1993 и 1994 гг.) с классификацией экосистем по данным дистанционного зондирования. Для всех типов экосистем, кроме болот, принимались нулевые величины УП CH_4 . Для густых рямов принималось Cpe3 УП, равное $0.8792 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$, а для разреженных рямов и безлесных торфяных топей – одна и та же величина³⁵ $9.7125 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$. С использованием описанной методологии для территории, охватываемой спутниковым снимком, получено среднее значение УП CH_4 $2.4708 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$.

[Tohjima et al., 1995]. Измерялась концентрация CH_4 в атмосфере при полетах самолета-лаборатории в Западной Сибири (1994 г.), в том числе 31.07.1994 г. в районе г. Ханты-Мансийск (61.05° с.ш., 69.00° в.д.). УП CH_4 рассчитывались по схеме метода «гигантской камеры». В предположении того, что время накопления метана в слое инверсии в районе г. Ханты-Мансийск такое же, как и в окрестностях пос. Плотниково (Томская обл.), где исследования проводились 3, 5 и 6 августа, для окрестностей г. Ханты-Мансийск получены следующие значения УП: из болот без древесной растительности – $3.0833 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$; покрытых древесной растительностью – $2.2917 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$.

[Tsuyuzaki et al., 2001]. В исследованиях, проведенных на северо-востоке Сибири летом 1995 г., выявлены взаимосвязи между УП CH_4 (измеренными СКА методом) и типом растительности. Растения учитывались на участках размером 50×50 см. При помощи кластерного анализа TWINSPAN было выделено три типа растительности (покрытие сосудистыми растениями везде составляло менее 50%):

- с преобладанием пушицы *Eriophorum*, но также присутствовало множество других видов, в т.ч. – мхи (здесь часто наблюдалось поглощение метана, поэтому в среднем УП = $-0.0792 \pm 0.2042 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$);
- с преобладанием хвоща и моховым покровом (здесь УП были максимальными – в среднем $6.8958 \pm 0.2833 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$);
- с преобладанием осоки, без мхов (УП = $3.05 \pm 0.2042 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$).

УП CH_4 возрастали с возрастанием глубины воды, глубины протаивания, влажности почвы и в наиболее сильной степени – с увеличением электропроводности (коэффициент корреляции Спирмена в последнем случае составлял 0.7937). Разница в эмиссии между местообитаниями, покрытыми растительностью

³³ Там, где мы употребили «типов поверхности» авторы используют термин «wetland ecosystem», что на русский язык было бы правильно перевести как «экосистем водно-болотных угодий» (а далее перечисляются «red pine, white birch, ...»). Но мы посчитали отнесение, в частности, зарослей березы (которые, скорее всего, являлись березовым лесом) к водно-болотным угодьям несколько опрометчивым и поэтому при переводе воспользовались общепринятым в дистанционном зондировании термином «типы поверхности».

³⁴ В «Abstract» оригинальной публикации вошли именно эти величины, но далее в тексте авторы приводят их в $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут.}^{-1}$, соответственно, 123.1 и 24.6 . Если эти числа перевести в $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$, то мы получим $123.1/24 \approx 5.1292$ и 1.025 . Даже если предположить, что величины 123.1 и $24.6 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут.}^{-1}$ представляют собой усеченные значения, то и тогда получить 5.246 и $1.081 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$ невозможно. Действительно, предположим, что 123.1 на самом деле представляет собой усеченное до одного знака после запятой значение $123.1(9) \approx 123.2$. Но $123.2/24 = 5.1(3) < 5.246$. Аналогичная картина и со значением 24.6 , которое в худшем случае может быть усеченным $24.6(9) \approx 24.7$. Но $24.7/24 \approx 1.0292 < 1.081$.

³⁵ Эта величина приведена нами по [Takeuchi et al., 2003] – она слегка различается в двух цитируемых работах и мы посчитали достойной большего доверия величину, опубликованную в рецензируемом издании.

различных типов, позволила авторам предположить, что для транспорта метана из почвы в атмосферу были важны анатомические характеристики сосудистых растений, такие как развитая аэренхима и межклеточное газонасыщенное пространство, которых мхи лишены.

[van der Molen et al., 2007; 2007a]. Измерения УП CO_2 и CH_4 были выполнены на ИП ($70^\circ 49' 36.28''$ с.ш., $147^\circ 29' 56.23''$ в.д.), расположенном в долине р. Индигирка близ пгт. Чокурдах (тундра, Ресурсный Резерват «Кыталык»). Это один из немногих ИП в российской тундре; от большинства других ИП он отличается континентальностью климата. Применявшиеся методы – СКа (как с обычными камерами, так и с микрокамерами для отдельных листьев), МиВП (начиная с 2003 г.) – позволили определить NEE, GPP, R_{eco} и УП CH_4 (последние – начиная с 2004 г.). Потоки CO_2 оказались необычно большими³⁶ в сравнении с другими ИП в тундре: $\text{NEE} = -92 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ (эта величина складывалась из $R_{\text{eco}} = +141 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ и $\text{GPP} = -232 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$). Такой значительный сток CO_2 авторы объясняют континентальностью климата данного ИП, который выражается, с одной стороны, в низких зимних температурах почвы (-14°C), что снижает интенсивность дыхания, а, с другой стороны, короткое, но относительно теплое лето обеспечивает высокую интенсивность фотосинтеза. УП CH_4 с учетом потенциала глобального потепления метана (т.е. в единицах его измерения гС будет иметь смысл $\text{гС}\cdot\text{CO}_2$, или, как говорят, «эквивалента CO_2 », что обозначается через $\text{гС}\cdot\text{CO}_2\text{e}$) составил $+28 \text{ гС}\cdot\text{CO}_2\text{e}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$; таким образом, баланс парниковых газов³⁷ составил $-64 \text{ гС}\cdot\text{CO}_2\text{e}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$. УП CH_4 были весьма чувствительны к гидрологическим условиям (уровень стояния воды и гидрохимия), геоморфологии и составу растительности, но лишь слабо зависели от температуры почвы. Среди факторов, определяющих суммарные годовые УП CO_2 , важнейшими были: солнечная радиация и продолжительность вегетационного сезона.

[van Huissteden et al., 2005]. Измерения УП CH_4 были выполнены на ИП ($70^\circ 48'$ с.ш., $147^\circ 26'$ в.д.), расположенном в долине р. Индигирка близ пгт. Чокурдах (тундра, Ресурсный Резерват «Кыталык»). УП CH_4 , измеренные СКа методом на террасе и в пойме, характеризовались сильной изменчивостью в пространстве. Величины УП CH_4 , полученные при измерениях на речной террасе, оказались близки к величинам УП CH_4 , ранее опубликованным для тундры другими исследователями. Среднее УП CH_4 составляет $4.3 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$ (соответственно, Среднее для влажных и сухих местообитаний составляют 7.2 и $0.18 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$, причем в последнем случае местами встречались отрицательные УП). Величины УП CH_4 , полученные при измерениях в пойме, оказались значительно выше: Среднее УП CH_4 составляет $12.5 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$ (соответственно, Среднее для влажных и сухих местообитаний составляют 23.4 и $1.6 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$). Многомерная регрессия показала, что УП CH_4 зависит от уровня стояния воды и толщины активного слоя почвы. Однако эти факторы сами по себе не могут объяснить большие УП CH_4 в пойме. Авторы предположили, что причинами этих больших УП являются, во-первых, более высокая первичная продуктивность пойменной растительности и высокая интенсивность транспорта метана, связанного с растительностью; а, во-вторых, увеличенное поступление субстратов метаногенеза в период затопления поймы (за счет осаждения частиц органики из воды). В связи с этим авторы считают, что их результаты показывают возможность значительного влияния изменений в переносе органического вещества арктическими реками на УП CH_4 в Арктике.

[van Huissteden et al., 2007]. Статистический анализ, проведенный для измерений, осуществленных СКа методом на болоте в арктической части северо-восточной Сибири (на многолетне-мерзлых породах), выявил главные факторы, определяющие образование CH_4 болотными почвами. Такими факторами оказались температура почвы, интенсивность продукции органического вещества и уровень стояния воды, причем последний фактор – самый важный. Для описания экспериментальных данных использовалась модель эмиссии CH_4 Walter-Heimann.

[van Huissteden et al., 2009]. В основном работа посвящена вопросам моделирования УП CH_4 из арктических болот при помощи модели PEATLAND-VU, в которой модуль, описывающий поведение CH_4 , основан на модели Walter-Heimann. Однако при тестировании модели авторам приходится рассматривать результаты измерений УП CH_4 , в частности для болота, расположенного в Ресурсном Резервате «Кыталык» (другие тестовые ИП находились вне территории России). Он находится в зоне распространения многолетне-мерзлых пород (при среднегодовой температуре -14.3°C) в Яно-Индигирской низменности близ пгт Чокурдах ($70^\circ 48'$ с.ш., $147^\circ 26'$ в.д.) на севере Восточной Сибири. Полевые измерения УП в Ресурсном Резервате «Кыталык» СКа методом были начаты летом 2004 г. и до 2006 г. включительно проводились раз в год во время коротких (4–6 дней) экспедиций, но с 2007 г. они стали проводиться в течение июля и части

³⁶ Приведенная далее величина NEE дана в [van der Molen et al., 2007]. В [van der Molen et al., 2007a] указано, что потребление CO_2 составляло порядка $60 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$.

³⁷ Приведенная далее величина баланса дана в [van der Molen et al., 2007]. В [van der Molen et al., 2007a] указано, что интенсивность стока парниковых газов для тундрового болота на ИП составила $1.7 \text{ гС}\cdot\text{CO}_2\text{e}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$.

августа. Основной целью работы является анализ чувствительности модели к параметрам в связи с необходимостью ее масштабирования от ИП к региональным масштабам, на которых параметры могут существенно отличаться от первоначально принятых в модели). В качестве метода анализа модели используется GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Analysis). GLUE – это подход, который включает в себя как определение чувствительности модели к параметрам, так и вычисление неопределенности результатов моделирования. Он позволяет установить неединственность решения задачи определения оптимального набора параметров модели, обеспечивающего минимум целевой функции – невязки между экспериментальными данными и результатами моделирования. Метод GLUE основан на многократных прогонах модели (авторы использовали 5000 прогонов для каждого ИП) со случайно выбранными наборами параметров, которые меняются при каждом следующем прогоне (естественно, каждый прогон дает свое значение целевой функции). Каждый параметр считается равномерно распределенным внутри установленного интервала. Авторы использовали три целевые функции: «Nash-Sutcliffe» ($= 1 - \sigma_e^2/\sigma_o^2$), «Regression Comparison» ($= 1 - \sigma_e^2/\sigma_r^2$) и «Summed Z score accounting for data error» ($= e^{-S \cdot A/T}$), где³⁸ $\sigma_e^2 = (T - 1)^{-1} \cdot \sum (Y_t - y_t)^a$, Y_t – значение зависимой переменной (в данном случае – УП), предсказанное моделью для t -го момента времени; y_t – значение зависимой переменной, наблюдавшееся в t -й момент времени; σ_o^2 – эмпирическая дисперсия наблюдений; σ_r^2 – дисперсия остатков многомерной линейной регрессии (для эмиссии метана в качестве многомерной линейной модели использовалась зависимость УП от уровня стояния воды и температуры почвы); S – параметр, принятый в данной работе равным 1; $A = \sum (|Y_t - y_t|/\sigma_t)$; σ_t – стандартная ошибка измерения УП (суммирование в вышеприведенных формулах осуществляется от $t = 1$ до $t = T$)³⁹. Как видим, из трех использованных целевых функций только Z позволяет учесть погрешность измерений. «Nash-Sutcliffe» и «Regression Comparison» с погрешностью измерений, к сожалению, никак не связаны. Однако, поскольку эти целевые функции основаны на сравнении дисперсий, при помощи F -критерия можно определить их статистическую значимость (с числом степеней свободы, определяемым количеством наблюдений T).

[Vasiliev and Naumov, 2001]. Измерения УП CO_2 и CH_4 СКА методом были выполнены на окраине Бакчарского болота (полигон Е, $56^\circ 51'$ с.ш. $82^\circ 51'$ в.д.), причем 5-6 июля и 19-20 августа осуществлялись круглосуточные измерения. Вдоль трансекты, прорезающей осоково-сфагновую растительную ассоциацию, размещалось пять камер: С1, С2 – кочки, покрытые *Sphagnum magellanicum*, *S. angustifolium*, *Carex limosa* и карликовыми кустарничками; С3, С5 – понижение (*Sphagnum majus*); С4 – частично покрытая водой мочажина, с полуразложившимися растительными остатками и отдельными живыми растениями *Sphagnum majus*. Для CH_4 средняя скорость эмиссии из торфа составила $1.22 \text{ мг} \cdot \text{С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ (STD=1.43), причем эмиссия из мочажин была больше, чем из положительных элементов микрорельефа. Эмиссия метана составляла от 2 до 4% общей эмиссии углерода. Для ИП также приводятся результаты измерения динамики эмиссии и поглощения суммы углерода CO_2 и CH_4 для каждой камеры; валовой первичной продукции (GPP); степени разложения органического вещества под камерами⁴⁰, а также ряда метеорологических параметров: продолжительности⁴¹ светлого времени суток с апреля по ноябрь; средне-многолетней минимальной температуры (с апреля по октябрь, но не для ИП, а для близлежащего г. Томск) и измеренных во время определения потоков температур воздуха и почвы (на глубине 10 см). Среди статистической информации приводятся коэффициенты корреляции для зависимости GPP от двух последних температур.

[Vourlitis and Oechel, 1996]. Обзор, в основном, основан на данных полевых измерений, полученных в Швеции, Канаде и на Аляске. Но среди прочих приводятся и литературные данные об УП (\pm STD), измеренных в России близ г. Воркута в июле 1990 г. (0.2208 ± 0.1958 и $4.3208 \pm 4.9917 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, соответственно, на возвышенных участках и в обводненных понижениях), а также в республике Коми в июле 1990 г. и в Тверской обл. в июле 1990 и 1991 гг. (от 0.0333 ± 0.0333 - 0.5792 ± 1.4417 до $21.2042 \pm 36.8875 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, в зависимости от конкретного ИП).

[Wagner and Morozova, 2006]. Проводились ежедневные измерения УП CH_4 , глубины протаивания, уровня стояния воды и температуры почвы с конца мая по конец июля 2004 г. в дельте р. Лена (о. Самойлов, $72^\circ 22'$ с.ш., $126^\circ 28'$ в.д., полигональная тундра)⁴² в пределах полигона с невысокой центральной частью.

³⁸ В цитируемой работе $a = 1$, но очевидно, что это ошибка. Должно быть $a = 2$.

³⁹ Хотя авторы и не указывают это в явном виде, но очевидно, что T – количество наблюдений.

⁴⁰ К большому сожалению, данный параметр приводится без указания единиц или методики измерения.

⁴¹ Под продолжительностью дня здесь понимается период, когда геометрический центр Солнца находится выше, чем 6° ниже горизонта.

⁴² Подробное описание места исследований и организации всей экспедиции см. в [Wagner and Bolshiyarov, 2006].

Эти измерения явились продолжением долговременного исследования эмиссии малых газовых составляющих, начатого в 1998 г. УП измерялись СКа методом с использованием 5 камер (съёмный колпак из оргстекла, основание из нержавеющей стали площадью $50 \times 50 \text{ см}^2$), что позволяло получать данные в нескольких повторностях одновременно из центральной части полигона и обводненной канавки вокруг него. Для обеспечения герметичности основание сверху было снабжено гидрозатвором, а его нижняя кромка заглублялась в почву на 15 см. Время экспозиции составляло 30 мин. В центральной части полигона сразу же после оттаивания почвы в начале июня наблюдались относительно высокие УП CH_4 ($> 10 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$), причем они увеличивались при дальнейшем протаивании активного слоя. Наибольшая эмиссия (около $7.5 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$)⁴³ наблюдалась в течение июля.

[Wagner et al., 2003; 2003a; 2003b; 2005]. В дельте р. Лена (72° с.ш. , 126° в.д.), начиная с 1999 г.⁴⁴ на протяжении 5 лет⁴⁵, проводились измерения УП CH_4 , а также изучение обуславливающих их микробиологических процессов образования и окисления CH_4 . В 1999 г. измерения начинались в конце мая и заканчивались в начале сентября. ИП представлял собой участок типичной полигональной тундры с ледяными жилами. Максимальная глубина протаивания на разных почвах составляла от 30 до 50 см. Среднегодовая температура -14.7°C , минимальная температура наблюдается в январе (-47.8°C), максимальная температура – в июле (18.3°C). УП в мочажине составляли в среднем $2.2167 \pm 0.3625 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$ (при максимальных значениях в середине июля $4.1667 \div 5 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$), а на более сухих валиках – $0.1958 \pm 0.1042 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$. Продукция и окисление CH_4 микроорганизмами сильно менялись в течение вегетационного периода. Образование CH_4 в верхнем почвенном горизонте мочажины было примерно в 10 раз больше ($38.9 \pm 2.9 \text{ мкмоль}\text{CH}_4\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{час}^{-1}$) в июле, чем в августе ($4.7 \pm 1.3 \text{ мкмоль}\text{CH}_4\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{час}^{-1}$). С окислением CH_4 дела обстояли наоборот: скорость окисления в верхнем почвенном горизонте была меньше ($1.9 \pm 0.3 \text{ мкмоль}\text{CH}_4\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{час}^{-1}$) в июле, чем в августе (максимальное значение: $7.0 \pm 1.3 \text{ мкмоль}\text{CH}_4\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{час}^{-1}$). Авторы считают, что их работа показала: условием для понимания сезонной и годовой динамики УП CH_4 являются их длительные измерения совместно с микробиологическими исследованиями. Образование CH_4 зависит, главным образом, от субстратов метаногенеза, тогда как окисление зависит от доступности кислорода. Температура играет незначительную роль в обоих этих процессах, вероятно потому, что микроорганизмы адаптировались к экстремальным температурным условиям вечномёрзлых пород. Авторы полагают, что для понимания динамики углерода в почвах зоны распространения вечномёрзлых пород необходимо разработать концептуальную схему микробиологических процессов и на ее основе – модели потоков CH_4 (в особенности – для таких ключевых регионов, как арктическая Сибирь).

[Wagner et al., 2005] – см. выше [Wagner et al., 2003].

[Wille et al., 2006]. Микрометеорологические измерения предыдущих двух лет в дельте р. Лена были продолжены и в 2004 г. (с 28 мая по 20 июля, покрывая, таким образом, период с конца зимы, когда температуры были еще отрицательными, и до середины лета, когда глубина активного слоя достигала около половины средне-максимального слоя протаивания). Эти измерения включали определение методом МиВП турбулентных потоков энергии, водяного пара, CO_2 (с поверхности в атмосферу), а также сопутствующие измерения метеорологических и почвенно-физических параметров. До 11 июня наблюдались, в основном, положительные величины УП CO_2 , демонстрировавшие слабые суточные колебания. После таяния снежного покрова начался фотосинтез. При дальнейшем протаивании почвы интенсивность дыхания увеличилась и в конце концов величины УП стали колебаться между $+72$ и $-288 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$, соответственно, ночью и днем (в своей работе авторы в графическом виде приводят все УП). При анализе динамики УП явно было видно влияние на них таких управляющих и лимитирующих факторов, как солнечная радиация, снежный покров и

⁴³ Скорее всего, в работе допущена ошибка. Действительно, если следовать авторам, то получается, что сразу после оттаивания почвы УП имели величины более $10 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$, потом они все время возрастали и в июле достигали уже целых $7.5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$! Заметим, что первую величину авторы приводят именно в $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$, а вторую – в $\text{мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$, (т.е. в оригинальной работе было значение $180 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$, которое мы перевели в $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$: $180 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1} = 180/24 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1} = 7.5 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$). Исходя из собственного опыта работы в тундре, мы должны заметить, что июльское значение $180 \text{ мг}\text{CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ ($7.5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$) кажется вполне возможным. А вот июньское $10 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$ – почти невероятным (если речь идет не об уникальном измерении, а о ежедневных измерениях, как это следует из оригинальной публикации)! С другой стороны, величина $10 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ была бы для июньской тундры вполне уместна, так что, возможно, авторы спутали размерность.

⁴⁴ В [Wagner et al., 2003a; 2005] утверждается, что измерения ведутся с 1998 г.

⁴⁵ Хотя в [Wagner et al., 2003] говорится именно о 5-летних измерениях, но все приводимые там средние и максимальные величины вместе с их погрешностями в точности совпадают с величинами из [Wagner et al., 2003a], где говорится лишь об исследованиях 1999 г. в [Wagner et al., 2003b] говорится об измерениях в экспедициях LENA 1999 и LENA 2000, но приводятся результаты измерения УП только для 1999 г. Таким образом, результаты всех цитируемых работ следует отнести только к 1999 г.

глубина протаивания почвы. Кроме того, в период с 13 июня по 24 июля были выполнены измерения СКА методом на 10 ИП, расположенных на различных типичных элементах микроландшафта полигональной тундры (в том числе не только на обычных, но и на разрушающихся низких центрах полигонов). Ежедневно в одно и то же время суток (для возможности сравнения результатов) выполнялось по крайней мере два цикла измерений, каждый из которых включал по крайней мере три изучаемых участка. Время экспозиции составляло 30 мин., а пробы воздуха из камеры отбирались каждые 10 мин и отправлялись для анализа концентраций в лабораторию (по результатам анализа УП CO₂ вычислялись методом линейной регрессии). К сожалению, результаты этих классических камерных измерений в рассматриваемой публикации не отражены. Кроме того, было выполнено 38 измерений УП непосредственно в поле при помощи фотоакустического газоанализатора. Авторы приводят лишь результаты двух из них, дающих, впрочем, довольно типичные значения: потребление CO₂ на уровне -69.48 мг·м⁻²·час⁻¹ и эмиссию +53.44 мг·м⁻²·час⁻¹.

[Wille et al., 2007; 2008]. Измерения потока CH₄ методом МиВП были выполнены в арктической тундре (дельта р. Лена, 72 °с.ш.). Измерения покрывали сезонный ход эмиссии с середины лета до начала зимы 2003 г. и от начала весны до середины лета 2004 г., включая периоды весеннего снеготаяния и осеннего промерзания почвы. Исследовательский полигон характеризовался континентальным климатом со среднегодовой температурой воздуха -14.7 °С и глубоким распространением очень холодных многолетнемерзлых пород. Микрорельеф влажной полигональной тундры складывался из возвышенных умеренно сухих участков, влажных понижений, полигональной сети трещин-канавок и озер. Удельные потоки метана оказались относительно низкими с типичными величинами на уровне 1.25 мгCH₄·м⁻²·час⁻¹ в середине лета. Они определялись главным образом температурой почвы и турбулентностью приземного слоя атмосферы. Влияние последнего фактора было приписано высокой степени распространения в тундре открытых водных поверхностей. Было обнаружено, что глубина протаивания почвы и уровень стояния воды не имеют ясно выраженного влияния на УП CH₄. Дополнительная эмиссия во время весеннего снеготаяния составляла около 3% от общего потока за весь период с июня по октябрь. Зимние эмиссии моделировались на основе эмпирических соотношений, идентифицированным по данным измерений. Эмиссия метана за год оценена величиной 3.15 г·м⁻² (что составляет несколько меньшее значение в сравнении с величинами, опубликованными для аналогичных экосистем). Эмиссия CH₄ достигает 14% в годовом углеродном балансе экосистемы. Принимая во внимание потенциал глобального потепления CH₄ можно сделать вывод о том, что эмиссия метана делает тундру впечатляющим источником парникового газа.

[Wille et al., 2008] – см. выше [Wille et al., 2007].

[Zimov et al., 1993]. На севере Восточной Сибири, приблизительно в 100 км к югу от арктического побережья (в точке с координатами 69° с.ш., 162° в.д.) измерялась эмиссия CO₂ из почвы. Место измерения было выбрано таким образом, что на относительно небольшой территории встречались все основные ландшафты, характерные для севера Восточной Сибири. Измерения проводились зимой 1989-1990 гг. при помощи двух принципиально разных методов. В первоначальных исследованиях УП CO₂ измерялся при помощи камерного метода (металлические камеры устанавливались до осеннего промерзания почвы), однако полученные им результаты демонстрировали высокую пространственно-временную вариабельность. В связи с обнаруженной вариабельностью, надежная оценка регионального потока потребовала бы значительно большего количества камер, чем было доступно в реальности. Поэтому дополнительно использовался более быстрый метод – «диффузионный»: поток CO₂ на поверхности снега вычислялся по градиенту его концентрации в толще снега (с использованием коэффициента диффузии, который определялся экспериментально, причем было показано, что в течение периода январь-апрель он изменяется в границах от 0.22 до 0.33 см²·с⁻¹). Использование относительно быстрого диффузионного метода позволило в период с начала декабря до конца апреля выполнить 5000 измерений УП в 135 точках. Было обнаружено, что измеренная величина эмиссии диоксида углерода вполне достаточна для объяснения наблюдаемого в этих широтах зимнего максимума его атмосферной концентрации. Источником CO₂ является биологическая активность в верхней части активного слоя почвы, расположенного выше уровня многолетнемерзлых пород.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор приносит благодарность всем рецензентам данной работы, советы которых позволили существенно улучшить исходный текст. Среди них особую благодарность хотелось бы выразить к.б.н. М.В. Чистотину, вклад которого в данную работу близок к соавторству, в частности, разд. «Терминология биологического круговорота углерода» был написан в значительной степени с использованием его указаний, причем он предоставил автору рис. 2 и разрешил опубликовать его.

ЛИТЕРАТУРА

- Анциферова О.А., Столповский А.В. 2007. Эмиссия CO₂ из почв западной части Калининградской области // III Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 4-8 июня 2007: Тезисы докладов. Пушино. С. 10-11.
- Белов П.Н., Афонин С.В. 2005. От физических основ, теории и моделирования к тематической обработке спутниковых изображений. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН. 266 с.
- Боч М.С. 1974. Болота тундровой зоны Сибири (принципы типологии) // Типы болот СССР и принципы их классификации / Под ред. Т.Г. Абрамовой, М.С. Боч, Е.А. Галкиной. Л.: Наука. С. 146-154.
- Ваганов В.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б. 2005. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сибирский экологический журнал. №4. С. 631-649.
- Вагнер Д., Самаркин В., Пфеффер Е.-М. 2000. Микробные процессы и биогеохимия потоков метана из болот сибирской тундры // Национальная конференция с международным участием «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 20-24 ноября, 2000: Тезисы докладов. Пушино. С. 81-82.
- Вомперский С.Э., Ковалев А.Г., Глухова Т.В. 2007. Динамика годовой эмиссии CO₂ из почв олиготрофных болот южнотаежной зоны России с учетом нанорельефа // III Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 4-8 июня 2007 г.: Тезисы докладов. Пушино. С. 18-19.
- Вомперский С.Э., Ковалев А.Г., Глухова Т.В., Смагина М.В. 2000. Эмиссия диоксида углерода и метана с поверхности почв лесных и болотных экосистем разной влажности в подзоне южной тайги и Европейской территории России // Национальная конференция с международным участием «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 20-24 ноября, 2000: Тезисы докладов. Пушино. С. 83.
- Вудвелл Дж. 1972. Круговорот энергии в биосфере // Биосфера / Под ред. М.С. Гилярова. М.: Мир. С. 41-59.
- Выгодская Н.Н., Курбатова Ю.А., Варлагин А.В., Милукова И.М., Козлов Д.Н., Татаринов Ф.А. 2003. Потоки CO₂ между атмосферой и бореальными экосистемами южной европейской тайги // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003: Тезисы докладов. Пушино. С. 29-30.
- Гальченко В.Ф., Дулов Л.Е., Крамер Б., Конова Н.И., Барышева С.В. 2001. Биогеохимические процессы цикла метана в почвах, болотах и озерах Западной Сибири // Микробиология. Т. 70. № 2. С. 215.
- Глаголев М.В. 1999. Математическое моделирование эмиссии метана из болот в атмосферу // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования (Материалы конференции). М.: ГЕОС. С. 175-177.
- 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; [под ред. М.В. Глаголева и Е.Д. Лапшиной]. Новосибирск: НГУ. С. 176-190. Статья также доступна по URL: <http://www.ugrasu.ru/international/unesco/publications/journal/documents/Sbornik.pdf>
- Глаголев М.В. 2010. Болотообразовательный процесс. Роль болот в круговороте CO₂ и CH₄. Томск: Изд-во ТГПУ. 112 с.
- Глаголев М.В. 2010а. Эмиссия CH₄ болотными почвами Западной Сибири: от почвенного профиля до региона: дис. ... канд. биол. наук. М. 211 с.
- Глаголев М.В., Головацкая Е.А., Шнырев Н.А. 2007. Эмиссия парниковых газов на территории Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. Т. 14. № 2. С. 197-210.
- Глаголев М.В., Голышев С.А., Фирсов С.Ю. 1999. Оценка переноса метана из почвы в атмосферу болотными растениями // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования (Материалы конференции). М.: ГЕОС. С. 177-180.
- Глаголев М.В., Жужман И.В., Чистотин М.В. 2003. К вопросу о существовании внутрисуточной динамики потока метана из болотной почвы // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003: Тезисы докладов. Пушино. С. 32-33.
- Глаголев М.В., Клепцова И.Е. 2007. Многолетний мониторинг эмиссии метана из болот Томской области // Материалы Российской конференции "Седьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу"; [под ред. М.В. Кабанова]. Томск: "Аграф-Пресс". С. 308-311.
- Глаголев М.В., Клепцова И.Е. 2009. Эмиссия метана в лесотундре: к созданию «стандартной модели» (Aa2) для Западной Сибири // Вестник ТГПУ. Вып. 3. С. 77-81. Статья также доступна по URL (дата обращения: 29.07.2010): <http://vestnik.tspu.ru/files/PDF/articles/Glagolev M. V., Kleptcova I. E. 77 81 3 81 2009.pdf>
- Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.С., Максютлов Ш.Ш. 2009б. Эмиссия CH₄ из болотных ландшафтов подтайги Западной Сибири: к «стандартной модели» Aa3 // Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири: Материалы международной научно-практической конференции. – Томск: "Ветер". - с. 141-144.
- Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.С., Максютлов Ш.Ш. 2009в. Эмиссия CH₄ из болотных ландшафтов подтайги Западной Сибири: к «стандартной модели» Ab4 // Восьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Мат-лы рос. конф. / Под ред. М.В. Кабанова. – Томск: "Аграф-Пресс". - с. 240-242.
- Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.С., Филиппов И.В., Максютлов Ш.Ш. 2010в. Эмиссия метана из болотных ландшафтов тундры Западной Сибири // Вестник ТГПУ. Вып. 3(93). С. 78-86. Статья также доступна по URL (дата обращения: 29.07.2010): <http://vestnik.tspu.ru/files/PDF/articles/batuev v. i. 78 86 3 93 2010.pdf>
- Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.В., Филиппов И.В., Мачида Т., Максютлов Ш.Ш. 2009а. Эмиссия метана из типичных болотных ландшафтов лесостепи Западной Сибири: к «стандартной модели» Bc5 // Вестник ТГПУ. Вып. 11(89). С. 198-206. Статья также доступна по URL (дата обращения: 29.07.2010): <http://vestnik.tspu.ru/files/PDF/articles/glagolev m. v. 198 206 11 89 2009.pdf>
- Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Филиппов И.В., Казанцев В.С., Мачида Т., Максютлов Ш.Ш. 2010. Эмиссия CH₄ из болотных ландшафтов подтайги Западной Сибири: к «стандартной модели» Bc5 // Вестник МГУ, сер. 17: Почвоведение. №2. С. 43-50.
- Глаголев М.В., Лапшина Е.Д., Плюснин И.И. 2007а. К вопросу об эмиссии метана болотными почвами Ханты-Мансийского автономного округа // Биологические ресурсы и природопользование: Сб. науч. тр. Вып. 10. Сургут: Дефис. С. 5-35.
- Глаголев М.В., Лебедев В.С., Наумов А.В., Инишева Л.И., Дементьева Т.В., Головатская Е.А.⁴⁶, Ерохин В.Е., Шнырев Н.А., Муханов В.В., Ножевникова А.Н. 2001. Определение эмиссии и окисления метана некоторыми болотами Томской области //

⁴⁶ В оригинальной публикации фамилия этого исследователя написана именно так, но на самом деле должно быть Головацкая.

Функции почв в биосферно-геосферных системах. Материалы международного симпозиума: Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 27-30 августа 2001 г. М.: МАКС Пресс. С. 148-149.

Глаголев М.В., Лебедев В.С., Смагин А.В., Ерохин В.Е., Оленев П.В., Большаков Е.А., Ножевникова А.Н. 2000. Окисление метана в болотах Западной Сибири (на примере Большого Васюганского Болота) // Национальная конференция с международным участием «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 20-24 ноября, 2000: Тезисы докладов. Пущино. С. 84.

Глаголев М.В., Максюттов Ш.Ш. 2009. «Стандартная модель» (Ab4) эмиссии CH₄ из болот Западной Сибири // Математическое моделирование в экологии / Материалы Национальной конференции с международным участием, 1-5 июня 2009 г. Пущино: ИФХиБПП РАН. С. 78-79.

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

Глаголев М.В., Сирин А.А., Лапшина Е.Д., Филиппов И.В. 2010б. Изучение потоков углеродсодержащих парниковых газов в болотных экосистемах Западной Сибири // Вестник ТГПУ. Вып. 3(93). С. 120-127. Статья также доступна по URL (дата обращения: 29.07.2010):

http://vestnik.tspu.ru/files/PDF/articles/gostisheva_m_v_120_127_3_93_2010.pdf

Глаголев М.В., Смагин А.В. 2003. Биогеофизика эмиссии метана из болотных почв // «Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации», Труды Всероссийской конференции, 22-25 декабря 2003, Факультет почвоведения МГУ. М.: ф-т почвоведения МГУ. С. 172-174.

Глаголев М.В., Смагин А.В. 2005. Приложения MATLAB для численных задач биологии, экологии и почвоведения. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 200 с.

Глаголев М.В., Смагин А.В. 2006. Количественная оценка эмиссии метана болотами: от почвенного профиля - до региона (к 15-летию исследований в Томской области) // Роль почв в биосфере: Тр. Ин-та экологического почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. – Вып. 7. Экология почв. Почвенные ресурсы. Модели почвообразования; [под ред. Г.В. Добровольского и Г.С. Куста]. М.: Изд-во Ин-та экологического почвоведения МГУ. М.: Изд-во «Советский спорт». С. 51-82. Статья опубликована также в электронном журнале

Доклады по экологическому почвоведению. Вып. 3. №3. С. 75-114 и доступна по URL:

http://jess.msu.ru/index.php?option=com_scibibliography&func=view&id=34&Itemid=121&catid=62

Глаголев М.В., Смагин А.В., Суворов Г.Г. 2003а. Использование портативного газоанализатора ПГА-7 для исследования углеродсодержащих газов в почвах // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003: Тезисы докладов. Пущино. С. 34.

Глаголев М.В., Суворов Г.Г. 2007. Эмиссия метана болотными почвами средней тайги Западной Сибири (на примере Ханты-Мансийского автономного округа) // Доклады по экологическому почвоведению. Вып. 6. №2. С. 90-162. Статья доступна по URL:

http://jess.msu.ru/index.php?option=com_scibibliography&func=view&id=55&Itemid=121&catid=65

Глаголев М.В., Филиппов И.В., Клепцова И.Е., Максюттов Ш.Ш. 2009. Эмиссия метана из типичных болотных ландшафтов севера Западной Сибири // Материалы по изучению русских почв. Вып. 6(33). – СПб.: Изд-во СПбГУ. С. 57-61.

Глаголев М.В., Чистотин М.В., Сирин А.А. 2004. Эмиссия парниковых С-газов из естественных и измененных при хозяйственном использовании болот (на примере участка Томской области) // Почвы. Национальное достояние России. Новосибирск: Наука-Центр. С. 340.

Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сирин А.А. 2005. Эмиссия CO₂ и CH₄ из измененных при хозяйственном воздействии и ненарушенных торфяных почв в условиях юга Западной Сибири // «Биосферные функции почвенного покрова»: Конференция, посвященная 100-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР В.А. Ковды (Пущино, 15-17 февраля 2005 г.). Пущино. С. 21.

Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сирин А.А. 2008. Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрохимия. №5. С. 46-58.

Глаголев М.В., Шнырев Н.А. 2006. Анализ космических снимков – перспективное направление в изучении газовой функции болотных экосистем // Болота и биосфера: Сборник материалов Пятой Научной Школы (11-14 сентября 2006 г.). Томск: Изд-во ЦНТИ. С. 104-114.

Глаголев М.В., Шнырев Н.А. 2007. Динамика летне-осенней эмиссии CH₄ естественными болотами (на примере юга Томской области) // Вестник МГУ, сер. Почвоведение. №1. С. 8-15.

Глаголев М.В., Шнырев Н.А. 2008. Летне-осенняя эмиссия CH₄ естественными болотами Томской области и возможности ее пространственно-временной экстраполяции // Вестник МГУ, сер. Почвоведение. №2. С. 24-36.

Глаголев М.В., Эгнатшвили Т.Д. 2004. Роль экспедиции отдела экологии в исследованиях проблемы парниковых газов на территории Западной Сибири // Комплексная программа «Каникулы». Сборник материалов из опыта работы Московского городского Дворца детского (юношеского) творчества. Выпуск 2: «Лето-2001». – М.: МГДД(Ю)Т. – с. 58-68.

Глухова Т.В., Ковалев А.Г., Смагина М.В., Вомперский С.Э. 1999. Оценка некоторых биотических компонентов углеродного цикла болот и лесов // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования (Материалы конференции). М.: ГЕОС. С. 182-185.

Глухова Т.В., Смагина М.В., Вомперский С.Э., Ковалев А.Г. 2003. Послепожарная биогенная эмиссия CO₂ в лесных осушенных олиготрофных торфяниках // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003 г.: Тезисы докладов. Пущино. С. 34-35.

Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. 2007. Влияние погодных и гидротермических условий на суточную и сезонную динамику эмиссии CO₂ с поверхности торфоболотных экосистем юга Западной Сибири // III Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 4-8 июня 2007 г.: Тезисы докладов. Пущино. С. 20-21.

Десятков Б.М., Бородулин А.И., Котлярова С.С. 1997. Определение потока аэрозольных частиц, выделяемых подстилающей поверхностью, путем решения обратной задачи их распространения в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. Т. 10. №6. С. 639-644.

Елсаков В.В., Хейкинен Ю. 2003. Роль сезонного прироста надземной биомассы растений в формировании углеродного баланса заболоченных сообществ Воркутинской тундры // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003 г.: Тезисы докладов. Пущино. С. 46-47.

- Заварзин Г.А. 2000. Круговорот углерода на территории России // Национальная конференция с международным участием «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 20-24 ноября, 2000: Тезисы докладов. Пушино. С. 17-20.
- Заварзин Г.А. 2001. Становление биосферы // Вестник РАН. Т. 71. №11. С. 988-1001.
- Замолодчиков Д.Г., Иващенко А.И., Лопес де Гереню В.О., Карелин Д.В., Сапронов Д.В., Честных О.В. 2000. Современное усиление эмиссии диоксида углерода южными тундрами северо-востока Европы // Национальная конференция с международным участием «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 20-24 ноября, 2000: Тезисы докладов. Пушино. С. 31.
- Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Иващенко А.И., Лопес де Гереню⁴⁷ В.О. 2003. Микрометеорологическая оценка биогенных потоков диоксида углерода в типичных тундрах Восточной Чукотки // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003 г.: Тезисы докладов. Пушино. С. 50.
- Зинченко А.В., Решетников А.И., Парамонова Н.Н., Привалов В.И. 2007. Метод мониторинга эмиссии заболоченной территории на основе атмосферных измерений // III Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 4-8 июня 2007 г.: Тезисы докладов. Пушино. С. 35.
- Икконен Е.Н., Сидорова В.А. 2000. Математическое моделирование эмиссии CO₂ из торфяной залежи мезоолиготрофного болота // Национальная конференция с международным участием «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 20-24 ноября 2000 г.: Тезисы докладов. Пушино. С. 113-114.
- Инишева Л.И., Головацкая Е.А. 2002. Сток и эмиссия углерода в Васюганском болоте // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития; [под ред. чл.-корр. РАН М.В. Кабанова]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. С. 123-133.
- Казанцев В.С., Глаголев М.В. 2008. Эмиссия CH₄ в подзоне северной тайги: «стандартная модель» Аа3 // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сборник научных трудов кафедры ЮНЕСКО Югорского государственного университета. Вып. 1. / Под ред. М.В. Глаголева и Е.Д. Лапшиной. Новосибирск: НГУ. С. 200-207. Статья также доступна по URL: <http://www.ugrasu.ru/international/unesco/publications/journal/documents/Sbornic.pdf>
- Казанцев В.В., Глаголев М.В. 2010. Эмиссия метана из болот экосистем средней тайги Западной Сибири // Материалы Всероссийской научной конференции XIII Докучаевские молодежные чтения «Органо-минеральная матрица почв» / Под ред. Б.Ф. Апарина. СПб.: Изд. дом СПбГУ. с. 33-34.
- Калюжный И.Л., Лавров С.А., Решетников А.И., Парамонова Н.Н., Привалов В.И. 2009. Эмиссия метана на олиготрофном болотном массиве северо-запада России // Метеорология и гидрология. № 1. С. 53-67.
- Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г. 2008. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука. 344 с.
- Клепцова И.Е., Глаголев М.В. 2009. Эмиссия метана из типичных болотных ландшафтов севера Западной Сибири // Материалы Всероссийской научной конференции XII Докучаевские молодежные чтения «Почвы и продовольственная безопасность России»; [под ред. Б.Ф. Апарина]. СПб.: Изд. дом СПбГУ. с. 205-207.
- Клепцова И.Е., Глаголев М.В., Филиппов И.В., Максюттов Ш.Ш. 2010. Эмиссия метана из рямов и гряд средней тайги Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 1. Вып. 1. С. 56-64. Статья также доступна по URL (дата обращения: 30.07.2010): http://www.ugrasu.ru/international/unesco/journal/content/2010_1/documents/Klepzova.pdf
- Клепцова И.Е., Глаголев М.В., Филиппов И.В., Максюттов Ш.Ш. 2010а. Эмиссия метана с эвтрофных болот южной тайги Западной Сибири // Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове / Сборник материалов IV Всероссийской научной конференции с международным участием (1-5 сентября 2010 г.) / Под ред. С.П. Кулижского, Е.В. Каллас и С.В. Лойко. Томск: ТМЛ-Пресс. Т. 2. С. 81-84.
- Клепцова И.Е., Корнюшенко Е.Г., Глаголев М.В. 2008. Эмиссия CH₄ в подзоне лесотундры: «стандартная модель» Аа3 // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сборник научных трудов кафедры ЮНЕСКО Югорского государственного университета. Вып. 1; [под ред. М.В. Глаголева и Е.Д. Лапшиной]. Новосибирск: НГУ. С. 191-199. Статья также доступна по URL (дата обращения: 30.07.2010): <http://www.ugrasu.ru/international/unesco/publications/journal/documents/Sbornic.pdf>
- Косых Н.П. 2000. Вход органического вещества с ежегодной чистой первичной продукцией в болота северной тайги Западной Сибири // Национальная конференция с международным участием «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 20-24 ноября, 2000: Тезисы докладов. Пушино. С. 33-34.
- Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Вишнякова Е.К. 2010. Биогеохимический круговорот в болотных экосистемах // Болота и биосфера: Материалы VII Всероссийской с международным участием научной школы (13-15 сентября 2010 г., Томск). Томск: Изд-во ТГПУ. С. 52-57.
- Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Паршина Е.К. 2010а. Продукционно-деструкционные процессы в болотных почвах // Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове. Сборник материалов IV Всероссийской научной конференции с международным участием (1-5 сентября 2010 г.) / Под ред. С.П. Кулижского, Е.В. Каллас и С.В. Лойко. Томск: ТМЛ-Пресс. Т. 2. С. 105-108.
- Левин И., Минаева Т.Ю., Нойманн Э. 2000. Некоторые данные об эмиссии С-газов с верхового болота и заболоченного леса в Тверской области // Национальная конференция с международным участием «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 20-24 ноября 2000 г.: Тезисы докладов. Пушино. С. 90.
- Минаева Т.Ю., Курбатова Ю.А., Татарин Ф.А., Русанович Н.Р. 2003. Сезонная динамика растительности как фактор формирования газообмена CO₂ между поверхностью и атмосферой на верховом болоте // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003: Тезисы докладов. Пушино. С. 80-81.
- Молчанов А.Г. 2000. Баланс углекислоты в заболоченном и суходольном сосновых насаждениях // Национальная конференция с международным участием «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 20-24 ноября, 2000: Тезисы докладов. Пушино. С. 40-41.
- Наумов А.В. 1999. Компоненты и процессы углеродного цикла верховых болот Западной Сибири // Климаты и цикл углерода: прошлое и современность (Тезисы рабочего совещания: Москва, 19-21 мая 1998 г.). М.: ГЕОС. С. 60.
- Наумов А.В. 2000. Северные болота как источник С-содержащих газов в атмосфере // Национальная конференция с международным участием «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 20-24 ноября, 2000: Тезисы докладов. Пушино. С. 42.
- Наумов А.В. 2002. Углекислый газ и метан в почвах и атмосфере болотных экосистем Западной Сибири. // Сибирский экологический журнал. № 3. С. 313-318.

⁴⁷ В оригинальной публикации фамилия этого исследователя написана именно так, но на самом деле должно быть Лопес де Гереню.

Наумов А.В. 2003. Болота как источник парниковых газов на территории Западной Сибири // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003: Тезисы докладов. Пушино. С. 86-87.

Наумов А.В., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Паршина Е.К. 2007. Углеродный баланс в болотных экосистемах Западной Сибири // Сибирский Экологический журнал. Т. 14. №5. С. 771-779.

Новиков В.В., Русаков А.В. 2005. Выделение и поглощение парниковых газов в мелиорированных торфяных почвах Ростовской низины // Почвоведение. №7. С. 844-850.

Новиков В.В., Степанов А.Л. 2001. Окисление метана в окультуренной торфяной почве // Функции почв в биосферно-геосферных системах. Материалы международного симпозиума: Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 27-30 августа 2001 г. М.: МАКС Пресс. С. 160-161.

Новиков В.В., Степанов А.Л. 2002. Сопряжение процессов микробного окисления метана и аммония в почвах // Микробиология. Т. 71. № 2. С. 272-276.

Новиков В.В., Степанов А.Л. 2003. Эмиссия парниковых газов в торфяных почвах разной степени освоения // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003: Тезисы докладов. Пушино. С. 90.

Новиков В.В., Степанов А.Л., Лебедева Е.В. 2007. Оценка влияния минерального азота на образование парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) в мелиорированных торфяниках // III Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 4-8 июня 2007 г.: Тезисы докладов. Пушино. С. 56.

Новиков В.В., Степанов А.Л., Поздняков А.И. 2010. Микробная трансформация метана, диоксида углерода и закиси азота в окультуренных торфяных почвах // Болота и биосфера: Материалы VII Всероссийской с международным участием научной школы (13-15 сентября 2010 г., Томск). Томск: Изд-во ТГПУ. С. 215-217.

Новиков В.В., Степанов А.Л., Поздняков А.И., Лебедева Е.В. 2004. Сезонная динамика эмиссии CO₂, CH₄, N₂O и NO из торфяных почв поймы р. Яхромы // Почвоведение. №7. С. 867-874.

Одум Ю. 1986. Экология. Т. 1. М.: Мир. 328 с.

Паников Н.С. 1998. Эмиссия парниковых газов из заболоченных почв в атмосферу и проблемы устойчивости // Экология и почвы. Избранные лекции I-VII Всероссийских школ. Том 1. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН. С. 171-184.

Паников Н.С., Зеленев В.В. 1992. Эмиссия CO₂ и CH₄ из северных болот в атмосферу: динамика, влияние экотопических факторов и возможные механизмы // Proceedings of the 1st International Conference on Cryopedology "Cryosols: the Effect of Cryogenesis on the Processes and Specularities of Soil Formation" / Под ред. Д.А. Гиличинского. Пушино: РАН. С. 174-181.

Паников Н.С., Семенов А.М., Тарасов А.Л., Беляев А.С., Кравченко И.К., Смагина М.В., Палеева М.В., Зеленев В.В., Скупченко И.В. 1992. Образование и потребление метана в почвах европейской части СССР // Ж. Эколог. химии. №1. С. 9-26.

Перт С.Д. 1978. Основы культивирования микроорганизмов и клеток. М.: Мир.

Прохоров А.М. (ред.). 1983. Советский энциклопедический словарь. М.: Сов. Энциклопедия. 1600 с.

Румшицкий Л.З. 1971. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука. 192 с.

Русалимова О.А., Лашинский Н.Н., Барсуков П.А. 2010. Эффект экспериментального потепления на баланс углерода и рост растений в южной тундре // Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове / Сборник материалов IV Всероссийской научной конференции с международным участием (1-5 сентября 2010 г.) / Под ред. С.П. Кулижского, Е.В. Каллас и С.В. Лойко. Томск: ТМЛ-Пресс. Т. 2. С. 177-180.

Смагин А.В., Глаголев М.В., Суворов Г.Г., Шнырев Н.А. 2003. Методы исследования потоков газов и состава почвенного воздуха в полевых условиях с использованием портативного газоанализатора ПГА-7 // Вестник МГУ, сер. Почвоведение. №3. С. 29-36.

Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Смагина М.В., Глаголев М.В., Шевченко Е.М., Хайдапова Д.Д., Губер А.К. 2001. Моделирование динамики органического вещества почв. М.: Изд-во МГУ. 120 с.

Сирин А.А., Чистотин М.В. 2007. Эмиссия углеродсодержащих парниковых газов осушенными болотами при добыче торфа и сельскохозяйственным использовании // III Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 4-8 июня 2007 г.: Тезисы докладов. Пушино. С. 66.

Филиппов Л.П. 1986. Явления переноса. М.: Изд-во МГУ. 120 с.

Хромов С.П., Мамонтова Л.И. 1955. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометиздат. 520 с.

Честных О.В., Берестовская Ю.Ю., Замолдчиков Д.Г., Карелин Д.В., Пименов Н.В., Васильева Л.В. 2007. Факторы контроля обмена парниковых газов в южных тундрах северо-востока Европейской части России // III Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 4-8 июня 2007 г.: Тезисы докладов. Пушино. С. 68-69.

Честных О.В., Лопес де Греню⁴⁸ В.О. 2003. Послепожарные изменения углеродного цикла в субарктической тундре северо-востока Европейской части России // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003: Тезисы докладов. Пушино. С. 124-125.

Шнырев Н.А., Глаголев М.В. 2006. Эмиссия метана из болот южной части Томской области // «Биология – наука XXI века»: 10-я Пушинская школа-конференция молодых учёных, посвященная 50-летию Пушинского научного центра РАН (Пушино, 17-21 апреля 2006 года): Сборник тезисов. Пушино: ПНЦ РАН. С. 243-244.

Шнырев Н.А., Глаголев М.В. 2007. Характерные значения потоков метана из болот Западной Сибири // Болота и биосфера: Сборник материалов Шестой Научной Школы (10-14 сентября 2007 г.). Томск: Изд-во ФГУ «Томский ЦНТИ». С. 300-305.

Шнырев Н.А., Глаголев М.В. 2007а. Характерные значения потоков метана из болот Западной Сибири // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: Прошлое и настоящее: Материалы Второго Международного полевого симпозиума (Ханты-Мансийск, 24 августа – 2 сентября 2007 г.) / Под ред. акад. С.Э. Вомперского. Томск: Изд-во НТЛ. С. 144-146.

Эберт К., Эдерер Х. 1988. Компьютеры. Применение в химии. М.: Мир. 416 с.

Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. 1984. Курс химической кинетики. М.: Высшая шк. 463 с.

Archibald S.A., Kirton A., van der Merwe M.R., Scholes R.J., Williams C.A., Hanan N. 2009. Drivers of inter-annual variability in Net Ecosystem Exchange in a semi-arid savanna ecosystem, South Africa // Biogeosciences. V. 6. P. 251–266. URL: <http://www.biogeosciences.net/6/251/2009/bg-6-251-2009.pdf> (дата обращения 19.12.2010).

⁴⁸ В оригинальной публикации фамилия этого исследователя написана именно так, но на самом деле должно быть Лопес де Гереню.

- Arneeth A., Kurbatova J., Kolle O., Shibistova O.B., Lloyd J., Vygodskaya N.N., Schulze E.-D. 2002. Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and a central Siberian bog II. Interseasonal and interannual variability of CO₂ fluxes // *Tellus B*. V. 54. Issue 5. P. 514-530.
- Arneeth A., Veenendaal E.M., Best C., Timmermans W., Kolle O., Montagnani L., Shibistova O. 2006. Water use strategies and ecosystem-atmosphere exchange of CO₂ in two highly seasonal environments // *Biogeosciences*. V. 3. No. 4. P. 421-437. URL: <http://www.biogeosciences.net/3/421/2006/bg-3-421-2006.pdf> (дата обращения 29.12.2010).
- Aselmann I., Crutzen P.J. 1989. Global distribution of Natural Freshwater Wetlands and Rice Paddies, their Net Primary Productivity, Seasonality and Possible Methane Emissions // *Journal of Atmospheric Chemistry*. V. 8. P. 307-358.
- Bartlett K.B., Crill P.M., Sass R.L., Harriss R.C., Dise N.B. 1992. Methane Emissions From Tundra Environments in the Yukon-Kuskokwim Delta, Alaska // *Journal of Geophysical Research*. V. 97. P. 16645-16660.
- Bleuten W., Lapshina E.D. (eds.) 2001. FGUU Scientific Reports 2001-1 "Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands". Utrecht: Utrecht University Physical Geography. P. 117, 121.
- Bohn T.J., Lettenmaier D.P., Sathulur K., Bowling L.C., Podest E., McDonald K.C., Friborg T. 2007. Methane emissions from western Siberian wetlands: heterogeneity and sensitivity to climate change // *Environmental Research Letters*. V. 2. No. 4. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045015.
- Bond-Lamberty B., Thomson A. 2010. A global database of soil respiration data // *Biogeosciences*. V. 7. No. 6. P. 1915-1926. doi: 10.5194/bg-7-1915-2010. URL: <http://www.biogeosciences.net/7/1915/2010/bg-7-1915-2010.pdf> (дата обращения 17.12.2010).
- Chevillard A., Karstens U., Ciais P., Lafont S., Heimann M. 2002. Simulation of Atmospheric CO₂ over Europe and Western Siberia Using the Regional Scale Model REMO // *Tellus B*. V. 54. Issue 5. P. 872-894.
- Christensen T.R. 1993a. Methane emissions from Arctic tundra // *Biogeochemistry*. V. 21. P. 117-139.
- Christensen T. 1993. Seasonal emission of methane from the active layer of organic tundra soils-scale and controlling factors // Joint Russian-American seminar on Cryopedology and global change (November 15-16, 1992, Pushchino). Pushchino: Pushchino Research Centre. P. 325-341.
- Christensen T.R., Ekberg A, Ström L, Mastepanov M, Panikov N., Öquist M., Svensson B.H., Nykänen H, Martikainen P.J., Oskarsson H. 2003. Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands // *Geophys. Res. Lett.*, V. 30. No. 7, 1414. doi:10.1029/2002GL016848.
- Christensen T.R., Jonasson S., Callaghan T.V., Havström M. 1995. Spatial variation in high-latitude methane flux along a transect across Siberian and European tundra environments // *Journal of Geophysical Research*. V. 100. P. 21035-21045.
- Christensen T.R., Lloyd D., Svensson B., Martikainen P.J., Harding R., Oskarsson H., Friborg T., Soegaard H., Panikov N. 2000. CONGAS: Biogenic controls on trace gas fluxes in northern wetlands // *Terrestrial Ecosystem Research in Europe: Successes, challenges and policy*. Extended abstract / Ed. by Sutton M.A. et al. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. P. 151-154.
- Christensen T.R., Prentice I.C., Kaplan J., Haxeltine A., Sitch S. 1996. Methane flux from northern wetlands and tundra. An ecosystem source modelling approach // *Tellus*. V. 48B. P. 651-660.
- Connolly J., Roulet N.T., Seaquist J.W., Holden N.M., Lafleur P.M., Humphreys E.R., Heumann B.W., Ward S.M. 2009. Using MODIS derived fPAR with ground based flux tower measurements to derive the light use efficiency for two Canadian peatlands // *Biogeosciences*. V. 6. P. 225-234. URL: <http://www.biogeosciences.net/6/225/2009/bg-6-225-2009.pdf> (дата обращения 19.12.2010).
- Crill P.M., Bartlett K.B., Harriss R.C., Gorham E., Verry E.S., Sebacher D.I., Madzar L., Sanner W. 1988. Methane Flux from Minnesota Peatlands // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 2. P. 371-384.
- Fedorov-Davydov D.G. 1993. Carbon dioxide behaviour in cryogenic soils of North-Eastern Asia // Joint Russian-American seminar on Cryopedology and global change (November 15-16, 1992, Pushchino). Pushchino: Pushchino Research Centre. p. 341-349.
- Flessa H., Rodionov A., Dyckmans J., Guggenberger G. 2006. Landscape controls of CH₄ fluxes and soil organic matter in a catchment of the forest tundra at the lower Yenisej // *Symptom of Environmental Change in Siberian Permafrost Region. Proceedings of the International Symposium of JSPS Core to Core Program between Hokkaido University and Martin Luther University Halle-Wittenberg* (29-30 November 2005 Sapporo, Japan) / Eds: R. Hatano, G. Guggenberger. Sapporo: Hokkaido University Press. P. 65-74.
- Friborg T., Soegaard H., Christensen T.R., Lloyd C.R., Panikov N.S. 2003. Siberian wetlands: Where a sink is a source // *Geophys. Res. Lett.* V. 30. No. 21. 2129, doi:10.1029/2003GL017797.
- Fung I., John J., Lerner J., Matthews E., Prather M., Steele L.P., Fraser P.J. 1991. Three-Dimensional Model Synthesis of the Global Methane Cycle // *Journal of Geophysical Research*. V. 96. No. D7. P. 13033-13065.
- Glagolev M.V. 1998. Modeling of Production, Oxidation and Transportation Processes of Methane // *Global Environment Research Fund: Eco-Frontier Fellowship (EFF) in 1997*. Tokyo: Environment Agency. Global Environment Department. Research & Information Office. p. 79-111.
- Glagolev M.V. 2008. Standard model of methane emission from the West Siberian wetlands // *Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: «ENVIROMIS-2008»* (28 июня - 5 июля 2008 г., Томск, Россия): Тезисы докладов. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. С. 74.
- Glagolev M.V., Belova S.E., Smagin A.V., Golyshev S.A., Tarasov A.L. 1999. Bubble's mechanism of gas transfer in the wetland soil // *Proceedings of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998*. Tsukuba: Isebu. P. 132-142.
- Glagolev M., Inisheva L., Lebedev V., Naumov A., Dement'eva T., Golovatskaja E., Erohin V., Shnyrev N., Nozhevnikova A. 2001a. The Emission of CO₂ and CH₄ in Geochemically Similar Oligotrophic Landscapes of West Siberia // *Proceedings of the Ninth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 2000* (Sapporo, Japan, 23-24 January, 2001). Sapporo: Kohsoku Printing Center. P. 112-119.
- Glagolev M., Kazantsev V., Sachs T., Maksyutov S. 2010. Methane Fluxes from Western Siberian Tundra Wetlands // *Abstracts from the Third European Conference on Permafrost "Thermal State of Frozen Ground in a Changing Climate During the IPY"* (13-17 June 2010, Svalbard, Norway). P. 274. URL: <http://www.eucop2010.no/circular/EUCOP%20III%20Abstracts.pdf> (дата обращения 14.06.2010).
- Glagolev M., Lebedev V., Glagoleva O., Erohin V., Olenev P., Nozhevnikova A. 2000a. Plant-mediated methane transport in West Siberian bog // *Quebec 2000: Millennium Wetland Event. Program with Abstracts of VI International Wetland Symposium*. Quebec. P. 476.
- Glagolev M.V., Panikov N.S., Inoue G. 1998. Modeling of Methane Emission to Atmosphere in West Siberian Wetland (Bakchar Bog, Tomsk Area) // *Proceedings of the Sixth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1997*. Tsukuba: Isebu. P. 175-190.

Glagolev M.V., Smagin A.V., Lebedev V.S., Shnyrev N.A. 2001. Generation, mass-transfer and transformation of methane in a peatland (on example of Bakcharskoe wetland) // Материалы международного полевого симпозиума "Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее" (г. Ноябрьск, 18-22 августа 2001 г.) / Под ред. С.В. Васильева, А.А. Титляновой, А.А. Величко. Новосибирск: ООО «Агентство Сибпринт». С. 79-81.

Glagolev M., Uchiyama H., Lebedev V., Utsumi M., Smagin A., Glagoleva O., Erohin V., Olenev P., Nozhevnikova A. 2000. Oxidation and Plant-Mediated Transport of Methane in West Siberian Bog // Proceedings of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999. Tsukuba: Isebu. P. 143-149.

Golovatskaya E.A., Belova E.V., Dementieva T.V., Inisheva L.I. 2001. Seasonal dynamics of carbon flows in native and antropogeneous oligotrophic and eutrophic bogs // Материалы международного полевого симпозиума "Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее" (г. Ноябрьск, 18-22 августа 2001 г.) / Под ред. С.В. Васильева, А.А. Титляновой, А.А. Величко. Новосибирск: ООО «Агентство Сибпринт». С. 82-84.

Heikkinen J.E.P., Elsakov V., Martikainen P.J. 2002. Carbon dioxide and methane dynamics and annual carbon balance in tundra wetland in NE Europe, Russia // Global Biogeochem. Cycles. V. 16. No. 4, 1115, doi:10.1029/2002GB001930.

Heikkinen J.E.P., Virtanen T., Huttunen J.T., Elsakov V., Martikainen P.J. 2004. Carbon balance in East European tundra // Global Biogeochem. Cycles. V. 18. GB1023, doi:10.1029/2003GB002054.

Heyer J., Berger U., Kuzin I.L., Yakovlev O.N. 2002. Methane emissions from different ecosystem structures of the subarctic tundra in Western Siberia during midsummer and during the thawing period // Tellus B. V. 54. Issue 3. P. 231-249. DOI:10.1034/j.1600-0889.2002.01280.x.

Ikkonen E.N., Kurets V.K., Grabovik S.I., Drozdov S.N. 2001. The Rate of Carbon Dioxide Emission into the Atmosphere from a Southern Karelian Mesooligotrophic Bog // Russian Journal of Ecology. V. 32. N. 6. P. 382-385. DOI: 10.1023/A:1012573815370

Inoue G., Maksyutov S., Panikov N. 1995. CO₂ and CH₄ emission from wetlands in west Siberia // Proceedings of the Third Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1994. Sapporo: iWORD. P. 37-43.

Inoue G., Takahashi Y., Maksyutov S., Sorokin M., Panikov N. 1997. Methane Emission Rate from the wetland in West Siberia and its Controlling Factors // Proceedings of the Fifth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1996. Tsukuba: Isebu. P. 34-39.

Izumi K., Machida T., Maksyutov S., Mitsumoto S., Utiyama M., Inoue G., Tohjima Y., Postnov A., Kopylov Y., Shmeter S., Nikolaev V., Vinnichenko N., Khattatov V. 1994. Distribution and Uptake of CO₂ over the Central West Siberian Lowland - Airborne Measurements of Greenhouse Gases over Siberia II // Proceedings of the Second Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1993. Tsukuba: Isebu. P. 220-225.

Izumi K., Machida T., Maksyutov S., Tohjima Y., Mitsumoto S., Utiyama M., Inoue G., Postnov A., Kopylov Y., Shmeter S., Nikolaev V., Vinnichenko N., Khattatov V. 1994a. Distribution and Uptake of CO₂ over Central West Siberian Lowland - Airborne Measurements of Greenhouse Gases over Siberia II // Proceedings of the International Symposium on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases. Sendai. P. 5-8.

Jagovkina S.V., Karol I.L., Zubov V.A., Lagun V.E., Reshetnikov A.I., Rozanov E.V. 2000. Reconstruction of the methane fluxes from the west Siberia gas fields by the 3D regional chemical transport model // Atmospheric Environment. V. 34. P. 5319-5328.

Kazantsev V.S., Glagolev M.V., Golubyatnikov L.L., Maksyutov S.S. 2010. Methane emissions from lakes in West Siberian wetlands // Geophysical Research Abstracts. Vol. 12. EGU2010-358. EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria).

Kazantsev V.S., Glagolev M.V., Golubyatnikov L.L., Maksyutov S.S. 2011. Methane emissions from tundra wetlands in West Siberia // Geophysical Research Abstracts, Vol. 13. EGU General Assembly 2011 (Vienna, Austria). *In press*.

Kirschke S., Guenther K.P., Wisskirchen K., Sachs T., Dech S. 2008. Methane Emission from Siberian Wet Polygonal Tundra on Multiple Spatial Scales: Process-Based Modeling of Methane Fluxes on the Regional Scale, Lena Delta // Ninth International Conference on Permafrost (June 29 - July 3, 2008, Fairbanks). P. 947-952.

Kjellström E., Holmén K., Eneroth K., Engardt M. 2002. Summertime Siberian CO₂ simulations with the regional transport model MATCH: a feasibility study of carbon uptake calculations from EUROSIB data // Tellus B. V. 54. Issue 5. P. 834-849.

Kotsyurbenko O.R., Chin K.-J., Glagolev M.V., Stubner S., Simankova M.V., Nozhevnikova A.N., Conrad R. 2004. Acetoclastic and hydrogenotrophic methane production and methanogenic populations in an acidic West-Siberian peat bog // Environmental Microbiology. V. 6. No. 11. P. 1159-1173.

Krasnov O., Maksyutov S., Shimoyama K., Suto H., Nadeev A., Shelevoi V., Glagolev M., Kosykh N., Machida T., Inoue G. 2010. Automatic chamber observations of methane and carbon dioxide fluxes at West Siberian wetland // American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract #GC33A-0921. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AGUFMGC33A0921K> (дата обращения 03.01.2011).

Kurbatova J., Li C., Tatarinov F., Varlagin A., Shalukhina N., Olchev J. 2009. Modeling of the carbon dioxide fluxes in European Russia peat bogs // Environ. Res. Lett. V. 4. No. 4. 045022. doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045022. Статья также доступна по URL (дата обращения: 15.12.2010): http://iopscience.iop.org/1748-9326/4/4/045022/pdf/1748-9326_4_4_045022.pdf

Kurganova I. 2003. Carbon Dioxide Emission from Soils of Russian Terrestrial Ecosystems // Interim Report IR-02-070. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis.

Kutzbach L., Schneider J., Sachs T., Giebel M., Nykänen H., Shurpali N.J., Martikainen P.J., Alm J., Wilmking M. 2007. CO₂ flux determination by closed-chamber methods can be seriously biased by inappropriate application of linear regression // Biogeosciences. V. 4. No. 6. P. 1005-1025. URL: www.biogeosciences.net/4/1005/2007/ (дата обращения 25.11.2010).

Kutzbach L., Wagner D., Pfeiffer E.-M. 2004. Effect of microrelief and vegetation on methane emission from wet polygonal tundra, Lena Delta, Northern Siberia // Biogeochemistry. V. 69. P. 341-362.

Kutzbach L., Wille C., Pfeiffer E.-M. 2007a. The exchange of carbon dioxide between wet arctic tundra and the atmosphere at the Lena River Delta, Northern Siberia // Biogeosciences. V. 4. No. 5. P. 869-890. URL: <http://www.biogeosciences.net/4/869/2007/bg-4-869-2007.pdf> (дата обращения: 01.01.2011).

Maksyutov S., Dorofeev A., Makhov G., Sorokin M., Panikov N., Gadzhiev I., Inoue G. 1999. Atmospheric methane concentrations over wetland: measurements and modeling // Proceedings of the Fourth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1995. Sapporo: Kohsoku Printing Center. P. 125-131.

Maksyutov S., Glagolev M., Kleptsova I., Sabrekov A., Peregon A., Machida T. 2010. Methane emissions from the West Siberian wetlands // American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract #GC41D-02. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AGUFMGC41D..02M> (дата обращения 03.01.2011).

- Maksyutov S., Inoue G., Fedoseev N., Fedoseev D. 1995. Continuous measurements of atmospheric methane and carbon dioxide at Yakutsk monitoring station // Proceedings of the Third Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1994. Sapporo: iWORD. P. 44-49.
- Maksyutov S., Inoue G., Sorokin M., Krasnov O., Vasiliev S. 2001. Automated observations of methane and carbon dioxide fluxes at Plotnikovo wetland site in 1998-1999 // Материалы международного полевого симпозиума “Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее” (г. Ноябрьск, 18-22 августа 2001 г.) / Под ред. С.В. Васильева, А.А. Титляновой, А.А. Величко. Новосибирск: ООО «Агентство Сибпринт». С. 105.
- Maksyutov S., Inoue G., Sorokin M., Nakano T., Krasnov O., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N., Vasiliev S. 1999a. Methane fluxes from wetland in west Siberia during April-October 1998 // Proceedings of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba: Isebu. P. 115-124.
- Maksyutov S., Sorokin M., Inoue G., Fedoseev N. 1997. Respiration Rate Estimations Based on Atmospheric Carbon Dioxide Measurements near Yakutsk // Proceedings of the Fifth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1996. Tsukuba: Isebu. P. 12-14.
- Maksyutov S.S., Machida T., Sasakawa M., Koyama Y., Saeki T., Shimoyama K., Glagolev M., Kim H., Inoue G., Fedoseev N., Arshinov M., Davidov D., Fofonov A., Krasnov O., Belan B.D. 2009. Tropospheric methane and carbon dioxide over West Siberia: observation data analysis, surface flux inventories and transport modeling // American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract #GC43B-05. URL (дата обращения 03.01.2011): <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009AGUFMGC43B..05M>.
- Mathews E., Fung I. 1987. Methane emission from natural wetlands: global distribution, area, and environmental characteristics of sources // Global Biogeochemical Cycles. V. 1. No. 1. P. 61-86.
- Moore T., Knowles R. 1990. Methane emissions from fen, bog and swamp peatlands in Quebec // Biogeochemistry. V. 11. P. 45-61.
- Moore T., Roulet N., Knowles R. 1990. Spatial and temporal variations of methane flux from subarctic/northern boreal fens // Global Biogeochemical Cycles. V. 4. P. 29-46.
- Morishita T., Hatano R., Sawamoto T., Nakahara O., Takahashi K., Isaev A.P., Desyatkin R.V., Maximov T.C. 2001. Methane Fluxes in Forest, Grassland, and Wetland Soils, Near Yakutsk, Russia // Proceedings of the Ninth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 2000. Sapporo: Kohsoku Printing Center. P. 150-155.
- Nakano T., Inoue G., Maksyutov S., Sorokin M. 1998. Automatic Measurements of Methane Flux in West Siberian Wetlands in 1997 Summer // Proceedings of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba: Isebu. P. 211-215.
- Nakano T., Kuniyoshi S., Fukuda M. 2000. Temporal variation in methane emission from tundra wetlands in a permafrost area, northeastern Siberia // Atmospheric Environment. V. 34. P. 1205-1213.
- Nakayama T. 1995. Estimation of methane emission from Siberian tundra wetlands // Proceedings of the Third Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1994. Sapporo: iWORD. P. 31-36.
- Nakayama T., Akiyama A. 1994. Measurement of Methane Flux in a Tundra Wetland, Mustakh Island in 1993 // Proceedings of the Second Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1993. Tsukuba: Isebu. P. 37-39.
- Nakayama T., Nojiri Y., Zeng Y. 1994. Measurement of Methane Flux from Alases around Yakutsk, Eastern Siberia in 1993 // Proceedings of the Second Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1993. Tsukuba: Isebu. P. 40-44.
- Naumov A.V. 2001a. Emission of CH₄ and CO₂ in connection with temperature conditions of peat bog soils in the northern taiga subzone // Материалы международного полевого симпозиума “Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее” (г. Ноябрьск, 18-22 августа 2001 г.) / Под ред. С.В. Васильева, А.А. Титляновой, А.А. Величко. Новосибирск: ООО «Агентство Сибпринт». С. 110-112.
- Naumov A.V. 2001. To the question of nature of methanotrophic complex in peat bog soils // Материалы международного полевого симпозиума “Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее” (г. Ноябрьск, 18-22 августа 2001 г.) / Под ред. С.В. Васильева, А.А. Титляновой, А.А. Величко. Новосибирск: ООО «Агентство Сибпринт». С. 113-115.
- Naumov A.V., Huttunen J.T., Repo M.E., Chichulin A.V., Peregon A.M., Filippov I., Lapshina E.D., Martikainen P.J., Bleuten W. 2007. West Siberian peatlands: comparative study of greenhouse gas emission in middle taiga and forest tundraclimatic conditions // Proceedings of the Second International Field Symposium “West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present” (Khanty-Mansiysk, August 24 – September 2, 2007) / Под ред. акад. С.Э. Вомперского. Tomsk: Изд-во НТЛ. С. 132-135.
- Odum E.P. 1983. Basic ecology. Philadelphia: Saunders College Publ. 613 p.
- Panikov N.S. 1994. CH₄ and CO₂ Emissions from Northern Wetlands of Russia: Source Strength and Controlling Mechanisms // Proceedings of the International Symposium on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases. Sendai. P. 100-112.
- Panikov N.S. 1999. Fluxes of CO₂ and CH₄ in high latitude wetlands: measuring, modeling and predicting response to climate change // Polar Research. V. 18. P. 237-244.
- Panikov N.S., Dedysh S.N. 2000. Cold season CH₄ and CO₂ emission from boreal peat bogs (West Siberia): Winter fluxes and thaw activation dynamics // Global Biogeochemical Cycles. V. 14. No. 4. P. 1071-1080.
- Panikov N.S., Dedysh S.N., Kolesnikov O.M., Mardini A.I., Sizova M.V. 2001. Metabolic and Environmental Control on Methane Emission from Soils: Mechanistic Studies of Mesotrophic fen in West Siberia // Water, Air, and Soil Pollution: Focus. V. 1. No. 5-6. P. 415-428.
- Panikov N.S., Glagolev M.V., Kravchenko I.K., Mastepanov M.A., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Naumov A.V., Inoue G., Maxutov S. 1997. Variability of methane emission from west-siberian wetlands as related to vegetation type // J. Ecol. Chem. V.6. N.1. P. 59-67.
- Peregon A., Maksyutov S., Naumov A., Glagolev M. 2008. Land-cover classification for inventory of the methane fluxes in west Siberian wetlands // Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, 2-2: EGU General Assembly 2008, (13-18 April 2008, Vienna, Austria).
- Petrescu A.M.R., van Huissteden J.C., Jackowicz-Korczynski M., Yurova A., Christensen T.R., Crill P.M., Bäckstrand K., Maximov T.C. 2008. Modelling CH₄ emissions from arctic wetlands: effects of hydrological parameterization // Biogeosciences. V. 5. P. 111-121.
URL: <http://www.biogeosciences.net/5/111/2008/bg-5-111-2008.pdf> (дата обращения 22.12.2010).
- Postnov A., Stulov E., Strunin M., Khattatov V., Tolchinsky Yu., Inoue G., Tohjima Y., Maksyutov S., Machida M. 1994. Vertical Turbulent Transport of Methane in the Atmospheric Boundary Layer over the Central Western Siberia – Airborne Measurements of Greenhouse Gases over Siberia VI // Proceedings of the International Symposium on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases (March 7-10, 1994, Sendai, Japan). Sendai. P. 30-33.

- Potter C.S. 1997. An ecosystem simulation model for methane production and emission from wetlands // *Glob. Biogeochem. Cycles*. V. 11. P. 495-506.
- Repo M.E., Huttunen J.T., Naumov A.V., Chichulin A.V., Lapshina E.D., Bleuten W., Martikainen P.J. 2007. Release of CO₂ and CH₄ from small wetland lakes in western Siberia // *Tellus*. V. 59B. P. 788-796. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2007.00301.
- Rozanov A.B. 1995. Methane Emission from Forest and Agricultural Land in Russia. WP-95-31. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis.
- Sachs T., Giebels M., Wille C., Kutzbach L., Boike J. 2008. Methane Emission from Siberian Wet Polygonal Tundra on Multiple Spatial Scales: Vertical Flux Measurements by Closed Chambers and Eddy Covariance, Samoylov Island, Lena River Delta // Ninth International Conference on Permafrost (June 29 – July 3, 2008, Fairbanks). P. 1549-1554.
- Sachs T., Wille C., Boike J., Kutzbach L. 2008a. Environmental controls on ecosystem-scale CH₄ emission from polygonal tundra in the Lena River Delta, Siberia // *J. Geophys. Res.* V. 113. G00A03, doi:10.1029/2007JG000505.
- Sawamoto T., Hatano R., Shibuya M., Saito H., Tuno Y., Takahashi K., Isaev A.P., Desyatkin R.V., Maximov T.C. 2001. Effect of Forest Fire on NEP in Taiga Soil Ecosystems, Near Yakutsk, Russia // Proceedings of the Ninth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 2000 / Eds.: M. Fukuda, Y. Kobayashi. Sapporo: Kohsoku Printing Center. P. 120-127.
- Sawamoto T., Hatano R., Shibuya M., Takahashi K., Isaev A.P., Maximov T.C. 2000. Effect of Forest Fire on Carbon Cycling in Taiga Soil-Plant Systems, Near Yakutsk // Proceedings of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999 / Eds.: G. Inoue, A. Takenaka. Tsukuba: Isebu. P. 230-236.
- Shimoyama K., Inoue G., Fukushima Y., Hiyama T. 2000. Seasonal Variations of Heat, Water Vapor and CO₂ Fluxes in West Siberian wetland // Proceedings of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999. Tsukuba: Isebu. P. 171-175.
- Schneider J., Grosse G., Wagner D. 2009. Land cover classification of tundra environments in the Arctic Lena Delta based on Landsat 7 ETM+ data and its application for upscaling of methane emissions // *Remote Sensing of Environment*. V. 113. P. 380-391.
- Schulze E.D., Prokuschkin A., Arneth A., Knorre N., Vaganov E.A. 2002. Net ecosystem productivity and peat accumulation in a Siberian Aapa mire // *Tellus*. V. 54B. P. 531-536.
- Sirin A., Chistotin M., Glagolev M., Minayeva T., Suvorov G. 2008. Green House Gas Emission from Peatlands and Land Use Practices in Russia // C. Farrell, J. Feehan (Eds.). "After Wise Use – The Future of Peatlands": Proceedings of the 13th International Peat Congress (8-13 June 2008, Tullamore, Ireland). V. 1: Oral Presentations. - THE INTERNATIONAL PEAT SOCIETY. – P. 633.
- Sirin A., Chistotin M., Glagolev M., Minayeva T., Suvorov G. 2009. Land Use and C-gas Emissions from Peatlands in Russia // The 2nd International Symposium "Peatlands in the Global Carbon Cycle", 25-30 September 2009, Prague, Czech Republic.
- Sirin A., Chistotin M., Suvorov G., Glagolev M., Kravchenko I., Minaeva T. 2010. Drained peatlands used for extraction and agriculture: biogeochemical status with special attention to greenhouse gas fluxes and rewetting // *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 12. EGU2010 P. 11623. EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria). Также доступна по URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010EGUGA..1211623S> (дата обращения 03.01.2011).
- Sirin A., Minaeva T., Chistotin M., Glagolev M., Suvorov G. 2009a. Land-use Changes on Peatlands in Russia and Green House Gas Emissions // *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11. P. 13134. EGU General Assembly 2009, (19-24 April 2009, Vienna, Austria). Также доступна по URL (дата обращения 03.01.2011): <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009EGUGA..1113134S>.
- Slobodkin A.I., Panikov N.S., Zavarzin G.A. 1993. Microorganism methane formation and consumption in tundra and middle taiga bogs // *Mikrobiologiya*. V. 61. P. 486-493.
- Styles J.M., Lloyd J., Zolotukhin D., Lawton K.A., Tchebakova N., Francey R.J., Arneth A.A., Salamakho D., Kolle O., Schulze E.-D.. 2002. Estimates of regional surface carbon dioxide exchange and carbon and oxygen isotope discrimination during photosynthesis from concentration profiles in the atmospheric boundary layer // *Tellus B*. V. 54. Issue 5. P. 768-783.
- Svensson B.H., Rosswall T. 1984. In situ methane production from acid peat in plant communities with different moisture regimes in a subarctic mire // *OIKOS*. V. 43. P. 341-350.
- Takakai F., Desyatkin A.R., Lopez L., Hatano R., Fedorov A.N., Desyatkin R.V. 2006. Greenhouse gas emissions from a Siberian alas ecosystem near Yakutsk, Russia // Symposium of Environmental Change in Siberian Permafrost Region. Proceedings of the International Symposium of JSPS Core to Core Program between Hokkaido University and Martin Luther University Halle-Wittenberg (29-30 November 2005 Sapporo, Japan); [Eds: R. Hatano, G. Guggenberger]. Sapporo: Hokkaido University Press. P. 11-25.
- Takeuchi W., Nakano T., Ochi S., Yasuoka Y. 2002. Estimation of Methane Emission from West Siberian Lowland with Sub-pixel Land Cover Characterization // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (25 Jun 2002), Toronto, Canada.
- Takeuchi W., Tamura M., Yasuoka Y. 2000. Estimation of the methane emission from west Siberian wetland by Scaling between NOAA AVHRR and SPOT/HRV data // 21 Asian Conference on Remote Sensing (5 Feb 2000): Taipei, Taiwan.
- Takeuchi W., Tamura M., Yasuoka Y. 2003. Estimation of methane emission from West Siberian wetland by scaling technique between NOAA AVHRR and SPOT HRV // *Remote Sensing of Environment*. V. 85. P. 21-29.
- Tamura M., Yasuoka Y. 1999. Observation of western siberian wetlands by using remote sensing techniques for estimating methane emission // Proceedings of the Fourth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1995. Sapporo: Kohsoku Printing Center. P. 133-138.
- Tohjima Y., Maksyutov S., Machida T., Inoue G. 1995. Airborne measurement of atmospheric CH₄ over the west Siberian lowland during the 1994 Siberian-Terrestrial Ecosystem-Atmosphere-Cryosphere Experiment (STEACE) // Proceedings of the Third Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1994. Sapporo: iWORD. P. 50-57.
- Tsuyuzaki S., Nakano T., Kuniyoshi S., Fukuda M. 2001. Methane flux in grassy marshlands near Kolyma River, north-eastern Siberia // *Soil Biology and Biochemistry*. V. 33. P. 1419-1423.
- Van der Molen M.K., van Huissteden J.C., Parmentier F.J., Petrescu A.M.R., Dolman A.J., Maximov T.C., Kononov A.V., Karsanaev S.V., Suzdalov D.A. 2007. The growing season greenhouse gas balance of a continental tundra site in the Indigirka lowlands, NE Siberia // *Biogeosciences*. V. 4. No. 6. P. 985-1003. URL: <http://www.biogeosciences.net/4/985/2007/bg-4-985-2007.html> (дата обращения 05.12.2010).
- Van der Molen M.K., Parmentier F.J., van Huissteden J., Kononov A.V., Dolman A.J., Maximov T.C. 2007a. The greenhouse gas balance of a Northeast Siberian tundra site // III International conference «Emission and sink of greenhouse gases on the northern Eurasia territory», June 4-8, 2007: Abstracts. Pushchino. P. 78-79.
- van Huissteden J., Maximov T.C., Dolman A.J. 2005. High methane flux from an arctic floodplain (Indigirka lowlands, eastern Siberia) // *J. Geophys. Res.* V. 110. G02002. doi:10.1029/2005JG000010.

- van Huissteden J., Petrescu A.M.R., Hendriks D.M.D., Dolman A.J., Maximov T.C. 2007. Comparison of temperature and water table sensitivity of methane emission in temperate and arctic wetlands // III International conference «Emission and sink of greenhouse gases on the northern Eurasia territory», June 4-8, 2007: Abstracts. Pushchino. P. 79.
- van Huissteden J., Petrescu A.M.R., Hendriks D.M.D., Rebel K.T. 2009. Sensitivity analysis of a wetland methane emission model based on temperate and arctic wetland sites // *Biogeosciences*. V. 6. No. 12. P. 3035-3051. URL: <http://www.biogeosciences.net/6/3035/2009/bg-6-3035-2009.pdf> (дата обращения 20.12.2010).
- Vasiliev S.V., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P. 2001. Actual Carbon accumulation by crop measurement // FGUU Scientific Reports 2001-1 “Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands” / Eds.: W. Bleuten & E.D. Lapshina. Utrecht: Utrecht University Physical Geography. P. 87-96.
- Vasiliev S.V., Naumov A.V. 2001. Carbon gas emission measurements by land unit // FGUU Scientific Reports 2001-1 “Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands” / Eds.: W. Bleuten & E.D. Lapshina. Utrecht: Utrecht University Physical Geography. P. 79-87.
- Vourlitis G.L., Oechel W.C. 1996. The Role of Northern Ecosystems in the Global Methane Budget // *Ecol. Studies*. V. 124: Global Change and Arctic Terrestrial Ecosystems / W.C. Oechel (ed.). P. 266-289.
- Wagner D., Bolshiyarov D. 2006. Expedition Itinerary // *The Expeditions LENA 2004 and LIVINGSTON 2005* / Ed. by D. Wagner. Ber.: Polarforsch. Meeresforsch. P. 6-12.
- Wagner D., Morozova D. 2006. Long-term Studies on Methane Fluxes // *The Expeditions LENA 2004 and LIVINGSTON 2005* / Ed. by D. Wagner. Ber.: Polarforsch. Meeresforsch. P. 14-15.
- Wagner D., Kobabe S., Pfeiffer E.-M., Hubberten H.-W. 2003a. Microbial Controls on Methane Fluxes from a Polygonal Tundra of the Lena Delta, Siberia // *Permafrost Periglac. Process*. V. 14. P. 173-185. DOI: 10.1002/ppp.443.
- Wagner D., Lipski A., Embacher A., Gattinger A. 2005. Methane fluxes in permafrost habitats of the Lena Delta: effects of microbial community structure and organic matter quality // *Environmental Microbiology*. V. 7. Issue 10. P. 1582-1592. doi:10.1111/j.1462-2920.2005.00849.x.
- Wagner D., Pfeiffer E.-M., Hubberten H.-W. 2003. Long-term studies on methane fluxes from tundra environments in the Lena Delta, Siberia // *NECC Conference: The Carbon Balance of Aquatic and Terrestrial Ecosystems and their Interaction* (Lammi, Finland, 26-28 October 2003).
- Wagner D., Wille C., Kobabe S., Pfeiffer E.-M. 2003b. Simulation of Freezing-thawing Cycles in a Permafrost Microcosm for Assessing Microbial Methane Production under Extreme Conditions // *Permafrost and Periglac. Process*. V. 14. P. 367-374, DOI: 10.1002/ppp.468.
- Whittaker R.H., Likens G.E., Lieth H. 1975. Scope and purpose of this volume // *Primary productivity of the biosphere* / Eds. Lieth H., et al. Berlin: Springer. P. 3-5.
- Wille C., Heling L., Stoof G. 2006. Micrometeorological Measurements of Energy, Water, and Carbon Exchange between Arctic Tundra and the Atmosphere // *The Expeditions LENA 2004 and LIVINGSTON 2005* / Ed. by D. Wagner. Ber.: Polarforsch. Meeresforsch. P. 26-32.
- Wille C., Kutzbach L., Sachs T., Wagner D., Pfeiffer E.-M. 2007. Methane Emission from Siberian arctic polygonal Tundra: Eddy Covariance Measurements and Modeling // *European Geosciences Union* (Vienna, Austria, April 15-20).
- Wille C., Kutzbach L., Sachs T., Wagner D., Pfeiffer E.-M. 2008. Methane emission from Siberian arctic polygonal tundra: eddy covariance measurements and modeling // *Global Change Biology*. V. 14. P. 1395-1408. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01586.x
- Wofsy S.C., Goulden M.L., Munger J.W., Fan S.-M., Bakwin P.S., Daube B.C., Bassow S.L., Bazzaz F.A. 1993. Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest // *Science*. V. 260. No. 5112. P. 1314-1317.
- Zimov S.A., Zimova G.M., Davidov S.P., Davidova A.I., Voropaev Y.V., Voropaeva Z.V., Prosiannikov S.F., Prosiannikova O.V., Semiletova I.V., Semiletov I.P. 1993. Winter Biotic Activity and Production of CO₂ in Siberian Soils: A Factor in the Greenhouse Effect // *J. Geophys. Res.*, V. 98. No. D3, P. 5017-5023.

ANNOTATED REFERENCE LIST OF CH₄ AND CO₂ FLUX MEASUREMENTS FROM RUSSIA MIRES

Glagolev M.V.

Atmospheric CO₂ and CH₄ are the effective greenhouse gases. The increase in the concentration of radiatively active gases such as CO₂ and CH₄ has the potential to increase surface temperature and affect climate on a global scale. The concentration of atmospheric methane has doubled over the last century from a preindustrial concentration of 0.7 ppmv to the current level of 1.7 ppmv. Because of the potential effects of increased atmospheric CO₂ and CH₄ on the global energy budget, considerable effort has recently been made to quantify terrestrial CO₂ and CH₄ sources and sinks. Natural wetlands are important sources of CH₄ to the global atmosphere accounting for nearly 30% of the CH₄ produced annually. Analysis of global CH₄ emissions indicates that more than half of the annual wetland emission is from forested and nonforested wetlands from 50 to 70°N. Russia, Canada and Alaska are the major CH₄ sources to the atmosphere from high-latitude soils of the Northern Hemisphere, responsible for 64%, 11%, and 7% of these net emissions, respectively.

Estimates of the source and sink strength of boreal, subarctic, and arctic wetlands have received considerable attention in recent initiatives such as the 1988 Arctic Boundary Layer Experiment (ABLE) and the 1990 Canadian Northern Wetlands Study (NOWES). The results of these experiments have been published in dedicated volumes of the Journal of Geophysical Research and other well known scientific journals. Of course the reviews reflect mainly these papers. For example 21 out of the 25 CH₄ flux estimates listed by Vourlitis and Oechel [1996] for arctic and subarctic ecosystems are from Alaska and 23 out of the 34 estimates of boreal wetland CH₄ flux are derived from studies of Canadian boreal wetlands. Unfortunately reported estimates of CH₄ flux extrapolated from plot-level arctic, subarctic, and boreal wetlands (50 to 70°N) range between ca. 25-35 TgCH₄/yr to as high as 65 TgCH₄/yr. The high dispersion probably reflect the relatively limited date base that was available for Russia. Significant amount of CO₂ and CH₄ flux research has been conducted in Russia over the past 10-20 years. But the results of these experiments have been published mainly in national Russian scientific journals as well as Proceedings and Abstracts of symposiums.

Due to the uncertainty in the natural wetland CO₂ and CH₄ sources and sinks strengths, the aim of our paper is to review the publications which estimate CO₂ and CH₄ emissions in Russia and discuss how photosynthesis, respiration, methanogenesis, and methyltrophs are controlled here by their environment.

Time span covered in this annotated bibliography is from the beginning of the 1990s up to now. The list contains both primary sources and reviews, which report data on carbon dioxide or methane flux densities. Topics not covered are consumption and production of CH₄ and CO₂ by soil microcosms, time trends for C pools in ecosystems, experimental studies of photoassimilation. While the list is not exhaustive, an effort has been made to mention publications of all known to the compiler research groups, which have been engaged in measurements of CO₂ and CH₄ fluxes at Russian mires. Totally, about 200 annotations are included.

If the original source contains an authors' annotation, it is reproduced in the bibliography, sometimes with minor alterations. Otherwise, an annotation which summarizes methods and results of the study was written by the compiler. When we believed our own appraisals and comments on the original content to be desirable, they were inserted as footnotes.

Key words: methane, carbon dioxide, emission, NEE, NEP, NPP, GPP.

Поступила в редакцию: 30.09.2010
Переработанный вариант: 25.12.2010