

=====МАТЕРИАЛЫ ВТОРОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ=====
===== «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭКОЛОГИИ»=====

УДК: [551.510.41+551.510.522]:[547.211+556.56]

Идентификация газообмена на границе экосистема/атмосфера: метод обратной задачи

©2012 Глаголев М.В.^{*1,2,3,4}, Сабреков А.Ф.^{**4}

¹Институт экологического почвоведения, Москва, 119899, Россия

²Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Тюменская область, 628012, Россия

³Томский государственный педагогический университет, Томск, 634061, Россия

⁴Факультет почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия

Аннотация. Предложена методика получения данных, необходимых для определения удельного потока газа из почвы методом обратной задачи. По этой методике проведены измерения потока метана в олиготрофном болоте подзоны средней тайги. Определённые посредством предлагаемого метода значения удельного потока ($1.5\text{--}3 \text{ мгС-CH}_4\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$) оказались вполне сопоставимы с результатами измерений методом статических камер, проведённых на этом же объекте. Определена область влияния («футпринт»): её величина варьирует от первых сотен метров (в условиях неустойчивой стратификации атмосферы) до нескольких тысяч метров (в условиях сильно устойчивой стратификации). Даже с учётом погрешности метода и погрешностей, вносимых изменением футпринта в течение суточных наблюдений, предлагаемый способ позволил между двумя сериями измерений выявить различия удельного потока, которые, вероятно, возникли из-за природной динамики таких факторов эмиссии метана, как уровень болотных вод и температура поверхностного слоя почвы.

Ключевые слова: микрометеорологические методы, метод обратной задачи, поток газа из почвы, метан.

ВВЕДЕНИЕ

Газообмен на границе экосистема/атмосфера играет в экологии чрезвычайно важную роль. Например, Карелин и Замолотчиков [1] указывают, что с биологическим круговоротом углерода почти полностью отождествляются такие термины и понятия, как валовая первичная продуктивность, чистая первичная продуктивность, валовое дыхание, чистая экосистемная продуктивность – все они основаны на измерении потоков CO_2 . В связи с глобальным потеплением климата Земли ведётся детальное изучение источников эмиссии газов, приводящих к парниковому эффекту [2]. В дальнейшем мы ограничиваемся только примером определения удельного потока метана с поверхности болота. Однако следует подчеркнуть, что рассматриваемый в данной работе метод применим для измерения эмиссии (или поглощения) любой атмосферной примеси и практически для любого типа как природных (например, луг или болото), так и антропогенных (например, полигон захоронения твёрдых бытовых отходов) экосистем.

* m_glagolev@mail.ru

** misternickel@mail.ru

О метане и болотах в свете проблемы парниковых газов

Тем не менее, рассматриваемый нами частный пример эмиссии метана из болота важен и сам по себе: интерес к изучению цикла метана и получению точных количественных оценок интенсивности процессов эмиссии и поглощения этого газа на границе почва-атмосфера обусловлен высокой значимостью изменения содержания CH_4 в атмосфере для предсказания тренда глобальных климатических изменений, необходимостью управления запасами органического углерода на планете и стремлением к более глубокому пониманию фотохимических процессов, происходящих в атмосфере Земли [3]. Так, метан является вторым по важности парниковым газом после углекислого газа, отвечая примерно за 20% от прямой компоненты радиационного форсинга всех долгоживущих парниковых газов [4]. Метан также является вторым по важности стоком для гидроксильного радикала – ключевого окислителя земной атмосферы. Кроме того, метан играет значимую роль в накоплении тропосферного озона [5], а при окислении CH_4 образуется примерно половина от всей массы водяного пара в стратосфере [6].

Болота, благодаря идущим в их толще процессам анаэробного разложения органического вещества (подробнее об этом см., например, в [7]), выделяют от 100 до 230 $\text{TgCH}_4/\text{год}$ [8]. Учитывая, что общая эмиссия со всей Земли составляет от 500 до 600 $\text{TgCH}_4 \cdot \text{год}^{-1}$ [4], можно сделать вывод о том, что болота вносят существенный вклад в эмиссию метана. Но, как видим, разброс в оценках пока еще весьма велик, в связи с чем встаёт задача более точного определения удельного потока метана с поверхности болот.

Камерный метод измерения газообмена

Традиционно для определения удельных потоков газов с поверхности почвы использовался камерный метод. В своих различных вариациях он получил широкое распространение и развитие (от примитивных «воронок» или, иначе, «колоколов» Henrik'a Lundegårdh'a [9] и «стеклянного домика» Макарова [10] – до современных автоматических камер, как статических [11; 12], так и динамических [13]). Суть метода заключается в следующем: на поверхность почвы устанавливается «камера»; в простейшем случае – это куб, одно из оснований которого отсутствует (в остальном же камера герметична). Этой открытой частью камера ставится на почву, и если из почвы выделяются какие-то газы, то они поступают не в атмосферу, а в камеру. Естественно, концентрация выходящего из почвы газа будет в камере расти, и если мы имеем возможность количественного химического анализа накапливающегося газа, то по скорости изменения концентрации данного газа в камере можно рассчитать величину потока.

Основным и неустранимым недостатком камерного метода является то, что самим своим присутствием камеры вносятся существенные возмущения. Наиболее очевидным из них является, пожалуй, то, что при врезании основания камеры в почву воздухопроницаемость последней по периметру камеры (т. е. там, где проходит разрез) становится существенно больше. Если же говорить конкретно о болотных почвах, то следует учитывать, что их важными особенностями являются низкая устойчивость верхнего слоя к механическим воздействиям и высокие концентрации метана в жидкой и газовой фазе (конкретные экспериментальные значения для этих фаз см., соответственно, в [14, 15], а теоретическое обоснование, исходящее из физических свойств среды и биокинетических свойств микроорганизмов – в [16]). Эти особенности приводят к тому, что даже незначительное нарушение естественного сложения болота приводит к сильно искажённым значениям удельного потока метана из почв болот. Таким образом, для болотных почв особенно существенно то, что в процессе врезания основания и установки камеры, на почву оказывается избыточное давление (которого

она практически никогда не испытывает в естественных условиях), в результате чего происходит некоторая дегазация почвы.

Указанное увеличение воздухопроницаемости почвы и понижение газосодержания в ней должны изменять величину эмиссии (первое – в течение длительного времени, а второе – лишь до восстановления естественного газосодержания, что, впрочем может оказаться все равно дольше, чем время, в течение которого производятся измерения) вследствие изменения градиента концентрации метана в слое почвы [17].

Использование автоматических камер (см., например, [11–13, 18]), по-видимому, может быть эффективным средством борьбы с ошибками определения удельного потока, вызванными дегазацией. Во-первых, автоматические камеры, как правило, ставятся на очень длительный срок (месяцы, а чаще – годы), уже в начале которого газовый профиль почвы придет к своему естественному состоянию. Во-вторых, такие камеры, как ясно из самого их названия, работают в автоматическом режиме, следовательно, человек не приближается к ним и, таким образом, не оказывает избыточного давления на почву при каждом измерении.

Однако, хотя общепринятая точка зрения (о том, что основной неустранимый недостаток камерного метода связан с процессом врезания камеры), как видим, может быть оспорена, общий тезис (то, что *самим присутствием камеры вносятся существенные возмущения, влияющие на величину измеряемого потока*), к сожалению, бесспорен. *Во-первых, в камере изменяется температура (а она сильно влияет на процессы образования, потребления, транспорта метана и, следовательно, результирующего процесса его эмиссии – см., например, [14–16; 19] и ссылки там). Во-вторых, в камере изменяется влажность и световой режим – либо с течением времени при запотевании камеры из-за возрастания влажности, либо одновременно, когда используют темные камеры, чтобы уменьшить увеличение температуры (а изменение влажности и светового режима может влиять на растения, которые обеспечивают вынос большей части метана из почвы за счет неизвестного пока механизма – см., например, [15, 20–22] и ссылки там). В-третьих, в камере изменяется скорость движения воздуха – либо она падает до нуля, либо (в камерах, снабженных вентиляторами) задается на каком-то уровне, отличном от естественного (теоретическое обсуждение, экспериментальные данные зависимости потока метана от скорости ветра на границе вода/атмосфера, а также формулы для соответствующего коэффициента массообмена приведены, например, в [23–25]).*

Также важнейшим непреодолимым недостатком является «точечность» камерного метода. Действительно, если взглянуть на него с позиции глобального масштаба, то становится очевидно, что он, по сути, позволяет определить лишь поток в точке расположения камеры (объем самых больших камер составляет $\sim 10 \text{ м}^3$ [26] что, конечно же, всего лишь точка даже не в глобальном, а в региональном масштабе). Кроме того, важно отметить, что ввиду гетерогенности болота удельный поток даже в рамках одного микроландшафта может значительно различаться [14, 15, 27, 28]. В этой связи оценки потока с больших площадей могут содержать значительную ошибку, сглаживаемую, конечно, с помощью методов математической статистики, но всё равно существующую. Иначе говоря, оценки удельного потока, полученные с помощью камерного метода, являются малорепрезентативными [2, 29].

В связи с вышесказанным, к настоящему времени использование камерного метода начало сокращаться, а внимание исследователей переключается на «распределенные» методы, часто называемые также «микрометеорологическими».

Распределенные методы измерения газообмена

В самом общем виде идея микрометеорологических методов состоит в том, что величину потока газа (скажем, CH_4) из почвы можно определить по атмосферным измерениям концентрации этого газа [30] в нижних слоях атмосферы. Однако, строго

говоря, ставить знак равенства между «микрометеорологическими» и «распределенными» методами не совсем верно. Действительно, согласно классике микрометеорологии Сеттону [31], термин «микрометеорология» указывает на то, что предметом изучения являются физические процессы, имеющие место над ограниченными районами поверхности земли, главным образом в пределах нижних слоев атмосферы (обычно под этим подразумевается приземный слой атмосферы). Таким образом, с теоретической точки зрения, группа «микрометеорологических методов» входит в более общий класс «распределенных методов», не ограниченных нижними слоями атмосферы. Однако на практике в большинстве случаев для оценки потока с реально интересующей исследователя площади оказывается достаточным провести измерения лишь в нижних слоях атмосферы, т. е. из числа распределенных методов почти всегда используются именно микрометеорологические методы.

Подробнее с различными микрометеорологическими методами можно ознакомиться, например, в [29–32]. Все микрометеорологические методы, несмотря на их разнообразие и кажущиеся принципиальные различия в расчетных формулах, выводятся из одного и того же уравнения – дифференциального уравнения баланса массы газовой примеси, одна из наиболее общих форм которого приведена, например, в [29]. Таким образом, все микрометеорологические методы, с математической точки зрения, являются частными или предельными случаями решений обратной задачи восстановления неизвестной мощности источника по известному концентрационному полю.

Сравнение микрометеорологических методов между собой и с камерным методом неоднократно производилось в литературе – см., например, [33]. При этом был выявлен ряд недостатков тех или иных микрометеорологических методов (в то время как многие авторы, превознося эти методы по сравнению с камерным, о недостатках, все-таки присущих им, часто забывают сообщить читателю). Конкретный анализ недостатков, специфических для каждого микрометеорологического метода, проведен, например, в [32], а здесь мы лишь с самых общих позиций укажем следующее: поскольку все микрометеорологические методы являются частными или предельными случаями решения общей обратной задачи восстановления мощности источника, то понятно, что у них действительно могут быть недостатки, обусловленные выходом за пределы ограничений, накладываемых условиями, используемыми для получения соответствующих частных или предельных решений. Таким образом, *представляется привлекательным использовать метод обратной задачи в общем виде, не заботясь о нарушении тех или иных условий, в предположении которых получены его частные и предельные случаи.*

МЕТОД ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Постановка задачи

В достаточно общем виде распространение примеси в атмосфере может быть представлено как решение при начальных и граничных условиях дифференциального уравнения

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial c}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left((k_x + D) \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((k_y + D) \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((k_z + D) \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \right), \quad (1)$$

здесь c – математическое ожидание концентрации газа; u, v, w – средние значения компонентов скорости ветра, соответственно, вдоль горизонтальных осей x, y и вертикальной оси z ; k_x, k_y, k_z – соответствующие коэффициенты турбулентной диффузии; D – коэффициент молекулярной диффузии [2] примеси; t – время.

Рассматривается некоторая область атмосферы вне изучаемой экосистемы, но граничащая с ней. На этой границе задается условие 2-го рода, содержащее величину q

удельного потока (УП) примеси через границу. На других границах области ставятся соответствующие конкретной ситуации условия, обеспечивающие существование и единственность прямой задачи для (1).

Рассмотрим в качестве конкретного примера некоторую область пространства, включающую заболоченную местность и ограниченную плоскостями $x = 0$, $x = X$, $y = 0$, $y = Y$, $z = H$, а также плоскостью $z = 0$, соответствующей подстилающей поверхности. В этой области пространства можно задать начальное условие – исходное поле концентраций $c(x, y, z, 0)$. Кроме того, необходимо задать граничные условия. Пусть S – часть подстилающей поверхности, занятая болотом. Тогда на всей рассматриваемой области пространства Ω задаются следующие граничные условия:

$$c(0, y, z, t) = c(X, y, z, t) = c(x, 0, z, t) = c(x, Y, z, t) = c(x, y, H, t) = c_a(z, t);$$

$$K_z \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0, (x, y, 0, t) \in S} = -q; \quad K_z \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0, (x, y, 0, t) \notin S} = 0 \quad (2)$$

где c_a – фоновая атмосферная концентрация рассматриваемого газа, в общем случае зависящая от z , t .

Обозначим через C_{ij} концентрации газа, измеренные в каких-либо точках пространства с координатами (x_i, y_i, z_i) в моменты времени t_j . Можно поставить и решить обратную задачу: найти такое численное значение q , при котором экспериментально измеренные величины C_{ij} наиболее близки величинам $c(x_i, y_i, z_i, t_j)$, полученным при решении прямой начально-краевой задачи для уравнения (1) с граничными условиями (2) при данном q .

Замечание о некорректности обратной задачи

Поставленная нами выше обратная задача с математической точки зрения тождественна так называемой обратной задаче теплопроводности (ОЗТ), подробно рассмотренной в [34], где, в частности, утверждается, что ОЗТ – одна из многих задач, которые в математическом смысле являются некорректными. Вычислительная задача называется корректной (по Адамару-Петровскому), если выполнены следующие три требования: 1) ее решение существует при любых входных данных; 2) это решение единственно; 3) решение устойчиво по отношению к малым возмущениям входных данных. В том случае, когда хотя бы одно из этих требований не выполнено, задача называется некорректной [35]. Для решения некорректных задач следует использовать специальные регуляризующие алгоритмы [34]. При работе с регуляризующими алгоритмами, фактически, некорректная задача заменяется на близкую к ней (в некотором смысле), но уже корректную задачу. Однако для практических вычислений формальной корректности оказывается недостаточно.

Пусть вычислительная задача корректна (ее решение существует, единственно и устойчиво по входным данным). Решение вычислительной задачи называется устойчивым по входным данным, если оно зависит от входных данных непрерывным образом. Это означает, что для любого $\varepsilon > 0$ существует $\delta(\varepsilon) > 0$ такое, что всякому исходному данному, абсолютная погрешность которого (Δz) удовлетворяет условию $\Delta z < \delta$, отвечает приближенное решение, абсолютная погрешность которого (Δu) удовлетворяет условию $\Delta u < \varepsilon$. Теоретически, наличие у задачи устойчивости означает, что ее решение может быть найдено со сколь угодно малой погрешностью, если только гарантировать, что погрешности входных данных достаточно малы. Однако **на практике погрешности входных данных не могут быть сделаны сколь угодно малыми**, точность их ограничена [35]. Получается, что даже если задача теоретически устойчива ($\lim \varepsilon = 0$ при $\delta \rightarrow 0$), может оказаться, что взаимосвязь ε с δ такова, что весьма малым δ соответствуют чрезвычайно большие ε – настолько большие, что при практически достижимых минимальных погрешностях входных данных погрешности

результатов расчета оказываются неприемлемо велики. В связи с этим кроме понятия устойчивости (которое, как мы теперь видим, имеет, скорее, теоретический интерес) вводится более важное (с практической точки зрения) понятие *обусловленности*.

Задачу называют *хорошо обусловленной*, если малым погрешностям входных данных отвечают малые погрешности решения, и *плохо обусловленной*, если возможны сильные изменения решения. Кроме того, по аналогии с понятием обусловленности математической задачи вводится понятие *обусловленности вычислительного алгоритма*, отражающее чувствительность результата работы *алгоритма* к малым, но неизбежным ошибкам округления [35]. Таким образом, даже для регуляризованного алгоритма решения обратной задачи переноса примеси в атмосфере необходимо проверять обусловленность.

Область влияния (футпринт)

Для того чтобы понять, какая именно область экосистемы (или, как куда чаще бывает в природе, нескольких экосистем), формирует то значение потока, которое мы получаем в итоге, необходимо коснуться такого понятия, как «область влияния» (в последнее время более употребительным для этого понятия становится термин «футпринт», являющийся транслитерацией англоязычного термина footprint).

К сожалению, в англоязычной литературе термином «footprint» принято обозначать несколько разных (хотя и взаимосвязанных) понятий: «effective fetch», «source area» и «sensor footprints» [36]. В русскоязычной литературе вместо «footprint» иногда употребляется словосочетание «область влияния» (отражающее только одно из понятий, обозначаемых английским термином); кроме того, в отечественной литературе и презентациях на конференциях все шире используется вышеуказанный английский термин, но записанный русскими буквами – футпринт.

Согласно [37], футпринтом данной точки называется область, в какой-то (заданной!) мере определяющая измеренную величину общего потока, например, 90% этого потока (“...footprint, i. e., the area contributing by percentage, e. g., 90% of the total flux”). Подробное рассмотрение теории футпринта и конкретные модели для него см., например, в [36–41], причем в работе [36] даны ссылки еще на 22 конкретные модели футпринта.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследований

Исследования проводились 29–31 июля, 10–11 августа и 1–2 сентября 2010 г. на полевом стационаре «Мухрино» Югорского государственного университета. В качестве объекта исследования было выбрано болото «Мухрино» (60.9° с.ш., 68.6° в.д.), представляющее собой крупный полностью олиготрофный сильновыпуклый болотный массив, располагающийся на 3-й надпойменной террасе Иртыша в 25 км к юго-западу от г. Ханты-Мансийска (Ханты-Мансийский Автономный Округ). Периферийная часть занята рядами, ближе к центру площадь рядов уменьшается, и они представлены отдельными островами среди преобладающих здесь грядово-мочажинных комплексов. Измерения метеорологических параметров и концентрации метана проводились в центральной части массива, где находится обширная олиготрофная осоково-шейхцериево-сфагновая топь и несколько вторичных (с торфяным дном) озер. Уровень болотных вод в радиусе 40 метров от точки измерений колеблется в пределах от –40 до 15 см (отрицательные и положительные величины обозначают ситуации, когда уровень болотных вод, соответственно, выше и ниже усредненной поверхности мха). Значение рН варьирует от 3.8 до 4.2. Вдоль всего массива протекает внутриводоток, обрамленный мезоолиготрофной осоково-сфагновой топью (истоки р. Большая речка), значение рН для него 4.1–4.2. Средняя мощность торфа составляет 3–5 м [42]. Более

подробное описание гидрологии и флористического состава растительного покрова болота см. в [43]. Выбор именно этого объекта исследования продиктован в первую очередь логистическими соображениями, а также тем, что участок болота, на котором проходили исследования, как источник метана изучен достаточно подробно.

Синоптическая ситуация в районе измерений во время всех трёх сессий формировалась под влиянием антициклонов, причём 1–2 сентября некоторое влияние также было оказано подходящим атмосферным фронтом. Осадков за весь период измерений зафиксировано не было.

Метеорологические измерения

Метеовышка представляла собой вертикально установленный деревянный шест, на котором располагались анемометры (на высотах 0.8 м и 1.8 м над поверхностью болота), датчики для измерения температуры (на высотах 0.4 м, 0.7 м, 1.7 м, 5.8 м). Также на метеовышке были установлены пробоотборники для отбора проб воздуха на двух высотах: 170 и 600 см над поверхностью болота.

Температура определялась электронными датчиками «Thermochron iButton» DS1921G–F5 и DS1921Z–F5 («DALLAS Semiconductor», США). Для предотвращения нагрева датчиков, происходящего при прямом попадании солнечных лучей, их помещали в центр полых цилиндров, обклеенных светоотражающим материалом. Цилиндры устанавливались таким образом, чтобы горизонтальные потоки воздуха свободно проникали внутрь цилиндра.

Скорость ветра измерялась с помощью ручного чашечного анемометра МС–13. Характеристики этого анемометра не позволяют ему измерять скорость ветра ниже $0.3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Поэтому для случаев, когда на протяжении измерения анемометр останавливался, принималась следующая формула расчёта скорости ветра за период измерения $U \text{ [м}\cdot\text{с}^{-1}]$:

$$U = (U_{\text{факт}} \cdot t_{\text{движ}} + 0.15 \cdot t_{\text{ост}}) / t_{\text{общ}}$$

где $U_{\text{факт}} \text{ [м}\cdot\text{с}^{-1}]$ – фактическая скорость ветра, измеренная за время $t_{\text{движ}} \text{ [с]}$, на протяжении которого анемометр вращался; $t_{\text{ост}} \text{ [с]}$ – время, на протяжении которого анемометр не вращался; $t_{\text{общ}} = t_{\text{движ}} + t_{\text{ост}}$ – общее время проведения одного измерения (в нашей работе оно составляло 600 с, температура усреднялась за этот же период). Как видно из формулы, для периода, когда анемометр не вращался, скорость ветра принималась равной $0.15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Пробы атмосферного воздуха отбирались в трёхкомпонентные шприцы объемом 20 мл повышенной герметичности (поршень с тремя кольцами). Отбор проб производился с помощью тонкой пластиковой трубки диаметром 2 мм, один конец которой находился в точке отбора, а к другому с помощью герметично прикреплённой иглы присоединялся сам шприц. Таких трубок устанавливалось две для одной точки отбора, причем отбор проб воздуха осуществлялся одновременно из обеих трубок (т.е. в двух повторностях). Перед каждым отбором пробы, предназначенной для анализа, осуществлялся «холостой» отбор (проба отбиралась, но выпускалась из шприца в окружающую атмосферу) с целью вытеснить воздух, оставшийся в трубке после предыдущего отбора. Периодичность измерений варьировала в пределах от 15 минут до 1 часа в зависимости от времени суток (в «ночное» время, то есть с 23:00 до 7:00, частота отбора увеличивалась ввиду более значительных колебаний концентрации CH_4). Измерения концентрации метана велись на двух высотах: 170 и 600 см над поверхностью болота. Для предотвращения утечек метана до момента хроматографического анализа (не позднее 48 часов после отбора) шприцы с пробами хранились в прокипяченной воде.

Метод статических камер и анализ газов

Для сравнения методов определения удельного потока использовался метод статических камер [44, 45]. Нержавеющее металлическое основание (площадью 37×37 или 40×40 см² и высотой 15 см) врезалось в почву не ранее, чем за 15 минут до проведения измерений. В желоб на основании заливалась вода, исполняющая роль гидрозатвора. Измерения проводились с постоянных или временных мостков (с целью уменьшения давления на торфяной слой). Камера из оргстекла ($30 \times 30 \times 30$ или $40 \times 40 \times 40$ см³) устанавливалась на основание и герметизировалась резиновой пробкой, через которую в моменты времени $t_0 = 0$, t_1 , t_2 и t_3 при помощи шприцев отбирались пробы газа. Время экспозиции ($t_3 - t_0$) выбиралось в соответствии с типом микрорельефа и варьировало от 21 минуты на точках с предположительно высокими потоками (например, на обводненных мочажинах) до 60 минут на точках с вероятно низкими потоками (например, в рьямах).

Концентрация газа в пробах с вышки и из камер измерялась на хроматографе «Кристалл-5000» («Хроматэк», Йошкар-Ола, Россия), оснащённом пламенно-ионизационным детектором, со стальными колонками (3 м), наполненными сорбентом HayeSep Q (80–100 mesh). Температура колонки – 70 С. Газ-носитель – азот (поток около 30 мл·мин⁻¹). Для ежедневной калибровки каждый раз использовались три смеси метан/воздух (производство National Institute for Environmental Studies, г. Цукуба, Япония) с концентрацией метана 1.99 ± 0.01 , 5 ± 0.01 и 9.84 ± 0.01 ppm.

Модели и расчеты

Примем допущения, что болото горизонтально однородно и орографически, и как источник CH₄, а также достаточно велико. Таким образом, уравнение (1) сводится к следующему уравнению, которое мы и будем использовать в качестве уравнения, описывающего динамику приземной концентрации метана:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left((K_z + D_0(T)) \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \right).$$

Нижнее граничное условие задавалось в виде условия второго рода:

$$(K_z + D_0) \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0} = q.$$

В качестве верхнего граничного условия использовалось условие первого рода:

$$c \Big|_{z=6.м} = c_{изм,6.м}.$$

Здесь c – концентрация метана в атмосфере [мгС–CH₄·м⁻³]; t – время [с]; z – вертикальная координата [м]; K_z – коэффициент турбулентной диффузии в вертикальном направлении [м²·с⁻¹], вычисляемый по схеме, данной в [46] (подробно алгоритм Берлянда описан также в [32]); D_0 – коэффициент молекулярной диффузии метана равный $2.1 \cdot 10^{-5}$ м²·с⁻¹ при 0 °С [47] и являющийся функцией температуры воздуха T [°С]; q – удельный поток метана с поверхности болота [мгС–CH₄·м⁻²·ч⁻¹], $c_{изм,6.м}$ – экспериментально определённая концентрация метана на высоте 6 м [мгС–CH₄·м⁻³].

Собственно решение обратной задачи производилось при помощи минимизации функционала Φ , составленного следующим образом:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \left((C_{мод,i} - C_{эксп,i})^2 \cdot w_i \right)$$

где n – число экспериментально измеренных значений концентрации; $C_{мод,i}$ [мгС–CH₄·м⁻³] – значение концентрации метана в точке измерения, рассчитанное моделью по

полученной метеорологической информации (скорости ветра и температуре воздуха) для i -го момента времени; $C_{эксн,i}$ [мгС–СН₄·м⁻³] – измеренное значение концентрации метана для этого же момента времени. Веса (w_i) вычислялись по следующей формуле:

$$w_i = \frac{1}{(\Delta C_{\text{мод},i})^2} = \frac{1}{(0.102 \cdot (\ln(K_{z,i}(V)) - \ln(K_{z,i}(V - \Delta V))))^2} \quad (3)$$

Здесь $\Delta C_{\text{мод},i}$ – погрешность определения $C_{\text{мод},i}$; $K_{z,i}(V)$ – коэффициент турбулентной диффузии [м²·с⁻¹] на той же высоте, на которой определяется $C_{эксн,i}$, в тот же момент времени при реально измеренной скорости V ; $K_{z,i}(V - \Delta V)$ – коэффициент турбулентной диффузии [м²·с⁻¹] на той же высоте, на которой определяется $C_{эксн,i}$, в тот же момент времени при внесении погрешности ΔV в реально измеренную скорость V . Погрешность ΔV выбиралась в соответствии с табл. 1.

Таблица 1. Погрешность скорости ветра для различных её значений

<i>Интервал скоростей ветра V, м·с⁻¹</i>	<i>Погрешность скорости ветра ΔV, м·с⁻¹</i>
0.15 – 0.16*)	0.11
0.16 – 0.7	$0.258 \cdot V^2 + 0.103$
> 0.7	$0.194 + 0.05 \cdot V$

*)Примечание: Периодам времени, когда крыльчатка анемометра не вращалась или вращалась менее 1/10 от времени измерения (скорости ветра 0.15–0.16 м·с⁻¹) приписывалась погрешность 0.11 м·с⁻¹. Это значение выбиралось исходя из типичных значений скоростей ветра над болотами в летний период, приведённых в [48] (хотя с формально-математической точки зрения погрешность должна быть 0.15 м·с⁻¹).

Обусловленность описанного алгоритма проверялась многократным решением обратной задачи, причем каждый раз в исходные данные при помощи генератора псевдослучайных чисел вносились «погрешности», соответствующие по своей величине точности экспериментальных измерений (в каждый конкретный момент времени к значению температуры на каждой из двух высот прибавлялась распределённая равномерно от –0.25 до +0.25 случайная величина; значение погрешности датчиков ± 0.25 К было установлено экспериментально). В результате такого многократного решения получался набор величин УП; по отношению статистических характеристик его разброса (например, среднеквадратического отклонения или межквартильного размаха) к погрешности исходных экспериментальных данных можно было судить об обусловленности.

Расчет футпринта производился, в основном, по схеме Kogmann and Meixner [41]. Однако исходный вариант этой схемы приводит к значительным ошибкам в условиях сильно устойчивой стратификации атмосферы [49], соответствующей классу устойчивости F по Пэсквилу; в связи с чем мы использовали поправку универсальных функций для условий сильной устойчивости из [50]. Оценка площадей, занятых теми или иными микроландшафтами, проводилась с помощью программы MapInfo Professional 8.5 («MapInfo Corporation», США). Спутниковые снимки высокого пространственного разрешения, по которым производилось выделение объектов, выделяющих метан с разной интенсивностью, были взяты с сайта: <http://geoportal.ntsomz.ru/>.

Отсутствие влияния антропогенных источников эмиссии метана в точке измерений проверялось при помощи анализа обратных траекторий, проведенного по модели NOAA «HYSPLIT» (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) для высоты 100 метров над уровнем земной поверхности (с последующей визуализацией в Google Earth).

Удельный поток метана в камерах рассчитывали методом линейной регрессии с весами [51]. При этом значения удельных потоков, для которых коэффициент детерминации был меньше 0.85, отбрасывались (следуя [27, 52]).

Для решения прямой задачи использовалась стандартная функция `rdere` MATLAB («Mathworks», США), реализующая метод прямых (после дискретизации методом Галеркина / Петрова-Галеркина) [53]. Поиск минимума приведенного функционала осуществлялся с помощью метода наискорейшего спуска [54], программа для которого также была написана на языке Matlab.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выбор весов минимизируемого функционала

Обычно веса выбираются обратно пропорциональными квадратам ошибок [55], т.е. в нашем случае их можно выбирать обратно пропорциональными квадратам стандартных отклонений величин $C_{\text{мод},i}$. Основную погрешность при определении значения $C_{\text{мод},i}$ вносит низкая точность и чувствительность использованного чашечного анемометра: ошибки при определении скорости ветра вносят существенную погрешность в значения коэффициента диффузии, а последние – в значения $C_{\text{мод},i}$ (погрешность экспериментально измеренных значений $C_{\text{эксп},i}$ существенно ниже). Главная сложность при определении ошибки, вносимой в значение $C_{\text{мод},i}$ неточным измерением скорости ветра, состоит в том, что ошибки при определении скорости ветра ассиметрично влияют на значение коэффициента диффузии и, следовательно, на $C_{\text{мод},i}$ (понижение скорости на некоторую величину даст большее по модулю изменение $C_{\text{мод},i}$, чем повышение скорости на ту же величину). Однако распределение коэффициента диффузии можно сделать практически симметричным при помощи некоторого преобразования. Весьма удобно использовать для этого эмпирическую зависимость, полученную в работе [56] именно для рассматриваемых нами сейчас данных:

$$C_{\text{эксп},i} = -0.102 \cdot \ln(K_{z,i}) + 0.847, \quad R^2 = 0.83$$

где $K_{z,i}$ – коэффициент турбулентной диффузии [$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$] на той же высоте и в тот же момент времени, где и когда определяется $C_{\text{эксп},i}$. Поскольку $C_{\text{мод},i}$ и $C_{\text{эксп},i}$ должны быть близки, будем использовать именно это соотношение для определения погрешности $C_{\text{мод},i}$. Использование такого выражения выгодно тем, что функция логарифма делает погрешность $K_{z,i}$, а следовательно и погрешность $C_{\text{мод},i}$, симметричной. Погрешность $K_{z,i}$ определялась, как изменение значения $K_{z,i}$ при подстановке в модель скорости ветра V , из которой вычтена погрешность ΔV (правда, так как далее коэффициент диффузии становится симметричным, нет никакой разницы, прибавлять или вычитать погрешность). Это утверждение и формализовано в виде выражения (3).

Удельный поток

Результаты измерений атмосферной концентрации метана и вычисленные с помощью измеренных скорости ветра и температуры воздуха значения коэффициента диффузии для двух серий измерений приведены на рис. 1, 2. Значения самих этих метеовеличин, а также класс устойчивости (определённый согласно классификации Пэсквила, как она описана в [57]) приведены на рис. 3–5. Пунктиром на рис. 1 и 2 показаны профили концентрации, рассчитанные по модели, если к измеренным значениям скорости ветра прибавляли (нижняя пунктирная линия) или из них вычитали (нижняя пунктирная линия) погрешность измерения скорости ветра.

Удельный поток, вычисленный по данным, полученным 10–11 августа, оказался равен $1.45 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, а вычисленный по данным, полученным 1–2 сентября –

$3.03 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. В общем, можно сказать, что эти величины УП, полученные из решения обратной задачи, в среднем соответствовали величинам, которые дал для мочажин классический камерный метод (для которых медиана оказалась равна $2.6 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$). Кроме того, эти значения входят в диапазон результатов, полученных на данном болоте с помощью метода статических камер ранее (результаты измерений, проведённых в 2008–2010 гг., даны в [58]). Так, например, медиана удельного потока из олиготрофных мочажин этого болота в 2009 году равнялась $2.8 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, первая и третья квартиль – соответственно 1.9 и $3.7 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, минимум и максимум: -0.08 и $13.38 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$.

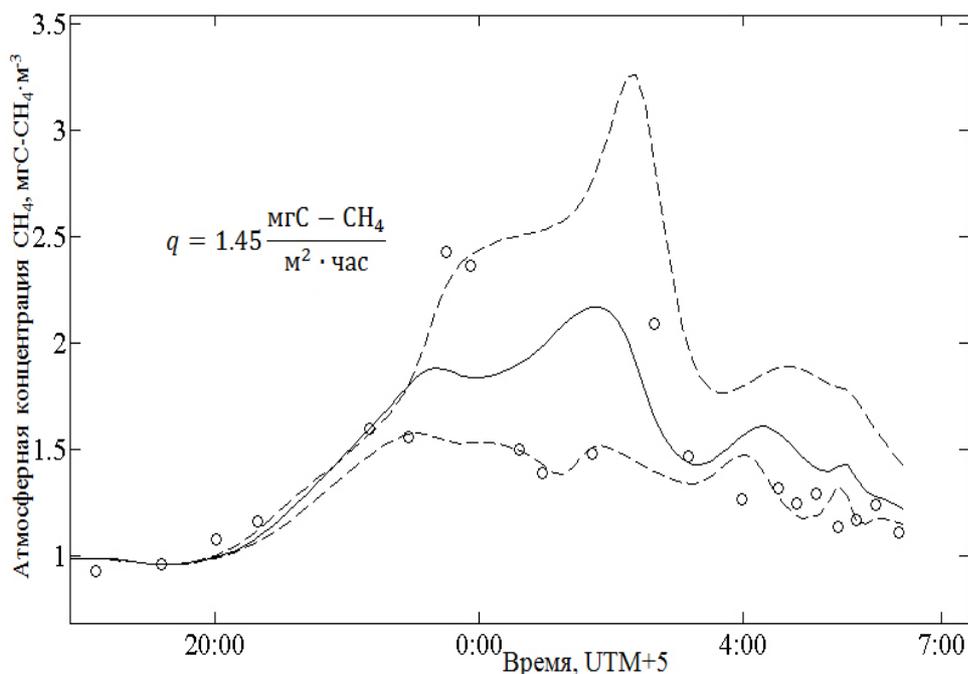


Рис. 1. Динамика атмосферной концентрации CH_4 10–11.08.2010 на высоте 1.7 м над болотом Мухрино. «○» – данные измерений (радиус окружности равен погрешности измерения концентрации CH_4); «—» – расчет по модели турбулентного переноса; «- -» – оценки точности расчёта.

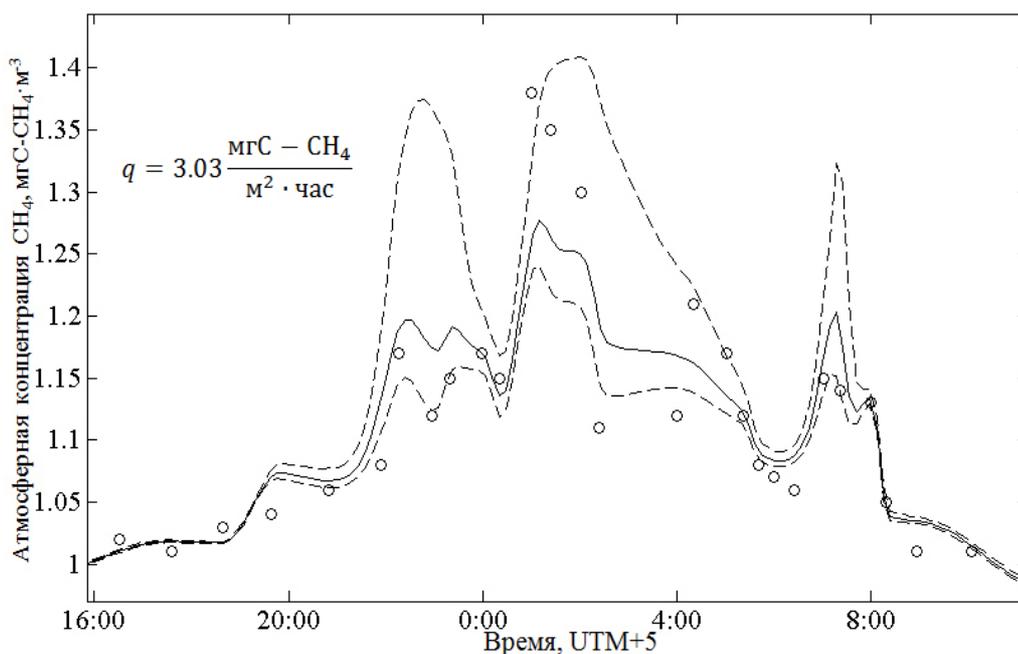


Рис. 2. Динамика атмосферной концентрации CH_4 1–2.09.2010 на высоте 1.7 м над болотом Мухрино. Обозначения см. на рис. 1.

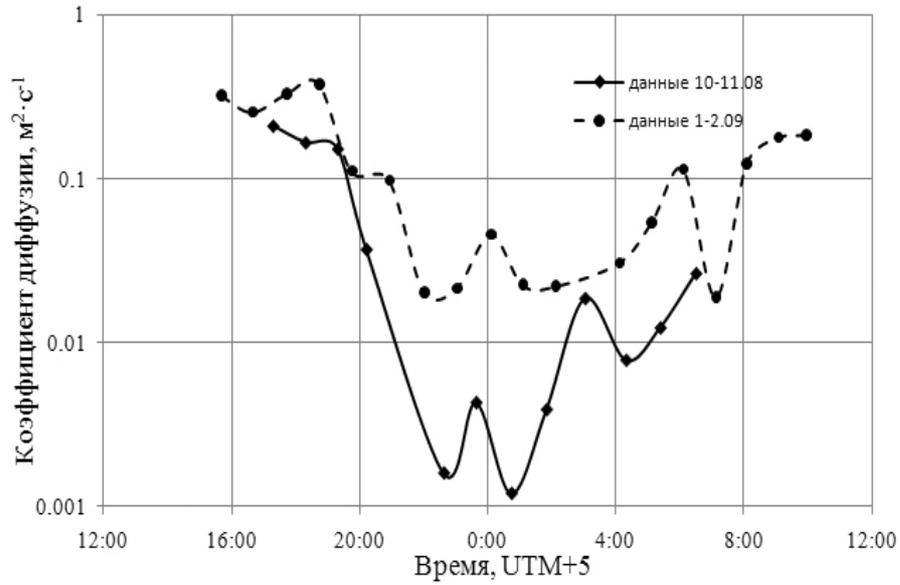


Рис. 3. Динамика коэффициента диффузии на высоте 1.7 м.

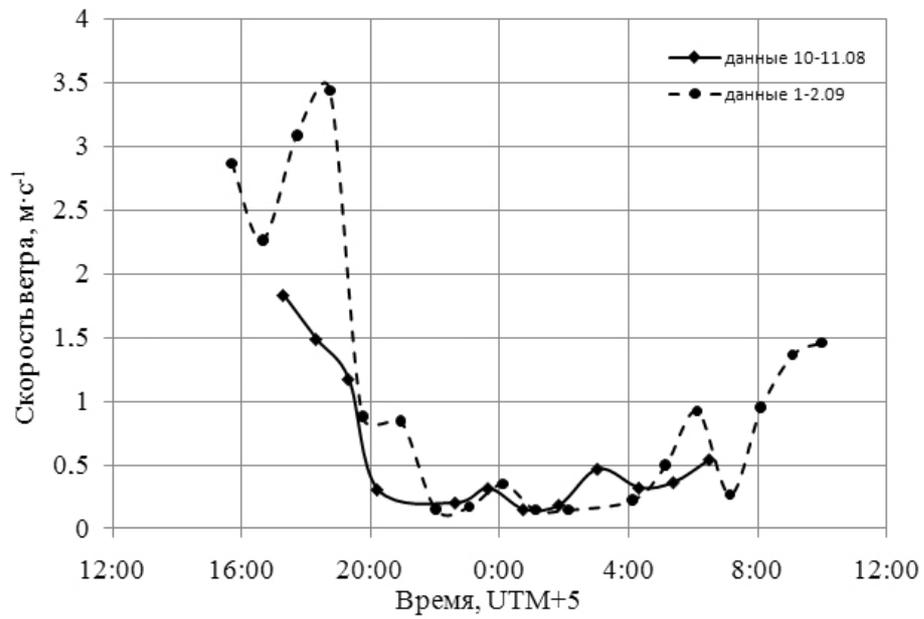


Рис. 4. Динамика скорости ветра на высоте 0.8 м.

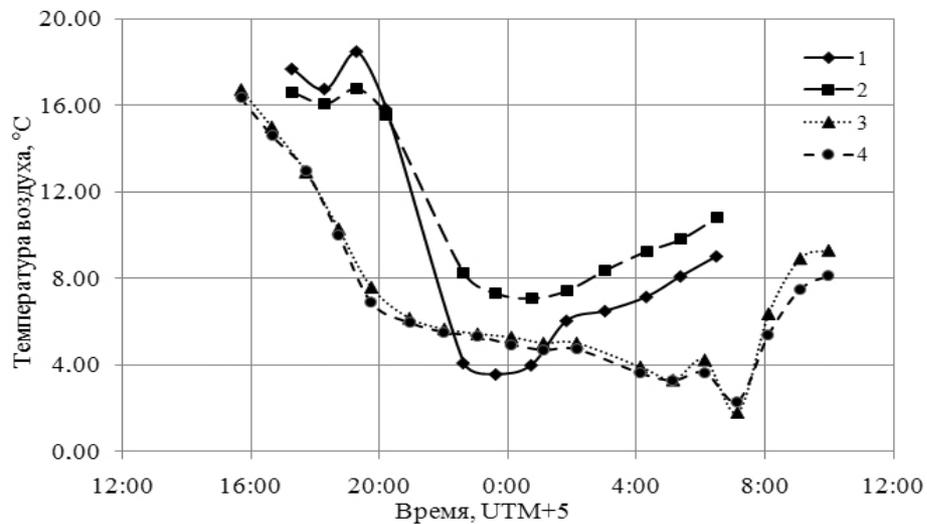


Рис. 5. Динамика температуры воздуха. 10–11.08.2010 на высотах: 1 – 0.45 м, 2 – 5.9 м; 1–2.09.2010 на высотах: 3 – 0.39 м, 4 – 5.74 м.

Погрешность (стандартное отклонение) для серии измерений, проведённых 10 – 11 августа, оказалась равна $\pm 0.06 \text{ мгС-СН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, а для проведённых 1–2 сентября – $\pm 0.23 \text{ мгС-СН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Таким образом, указанные серии измерений значительно различаются (практически в два раза). Это могут быть:

- Действительные различия, связанные с динамикой удельного потока, обусловленной изменением уровня болотных вод (УБВ) и температуры верхнего слоя болота. Измерениям 10–11 августа предшествовал достаточно жаркий и засушливый период. Затем, начиная с 15 августа (перед измерениями 1–2 сентября) происходило понижение среднесуточной температуры воздуха и начались сильные дожди, что повысило УБВ. Поскольку УБВ сильно влияет на величину удельного потока метана (см., например, [14; 19; 27; 59]), изменение этого уровня вполне могло привести к наблюдаемым различиям потока. Понижение температуры верхнего слоя торфа могло в свою очередь привести к понижению активности метанотрофных микроорганизмов, и как следствие, к увеличению удельного потока метана к 1–2 сентября (см. объяснение этого явления – т.н. «температурного гистерезиса эмиссии» – в [60]).
- Кажущиеся различия, причина которых может заключаться в том, что в период 10–11 августа ветер (юго-западный) дул с той части болота, где распространены микроландшафты с относительно низким значением УП СН_4 (т.н. «гряды»), а 1–2 сентября направление ветра было северо-западным, и метан приносился, в основном со стороны более активно выделяющих его крупных олиготрофных мочажин.

Для того, чтобы сделать выбор между вышеуказанными двумя возможными источниками различий, был проведен расчет футпринта каждой серии измерений.

Обусловленность задачи

Влияние ошибки измерения на получающееся значение потока показано на рис. 6. К экспериментально измеренной концентрации прибавлялись случайно сгенерированные по нормальному распределению величины погрешности, со средним, равным 0 и стандартным отклонением, равным 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 и 3 величинам стандартного отклонения, полученного при измерении концентрации на хроматографе по данным серии измерений 10–11 августа. Далее для каждого из искажённых значений концентраций подбирался такой поток, чтобы модельные и искажённые концентрации совпадали. Далее из получившегося массива для каждого из шести выбранных значений стандартного отклонения выбирались те значения потока, которые максимально отличались от получившегося по всей серии значения потока ($1.45 \text{ мгС-СН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$). Эти значения, отнесённые к величине потока, получившейся для всей серии, и показаны на рис. 6. Полученная картина свидетельствует об относительно плохой обусловленности задачи, если её решать без использования регуляризирующего функционала.

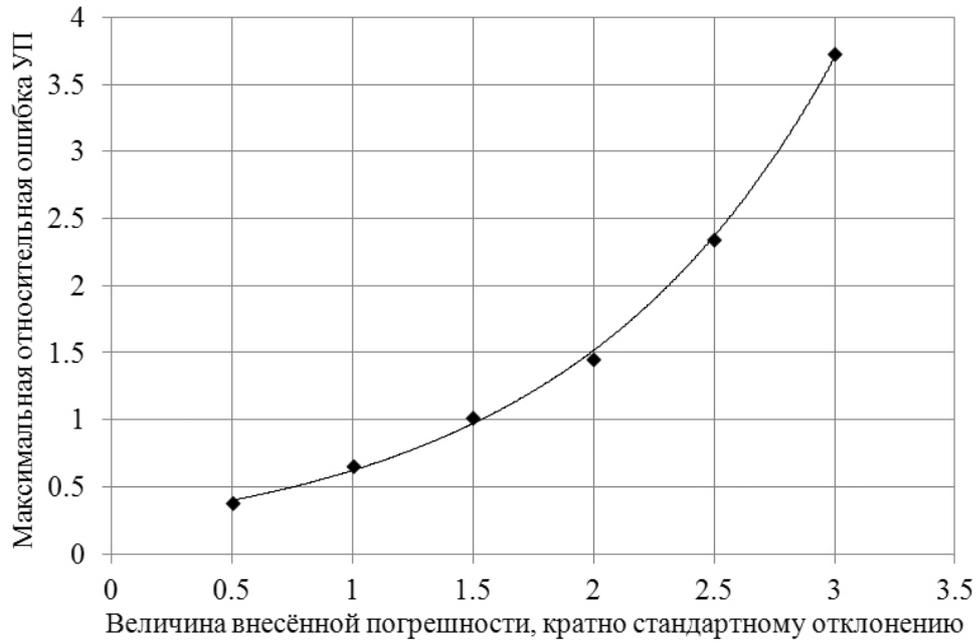


Рис. 6. Влияние искусственно внесённой в величину измеренной концентрации погрешности на максимальное значение относительной ошибки вычисления УП без использования регуляризующего функционала (для серии 10–11 августа).

Футпринт

В качестве примеров на рис. 7–10 приведены дифференциальные и интегральные функции футпринта как для условий сильно устойчивой стратификации атмосферы, так и для условий неустойчивой ее стратификации (и те и другие условия реально наблюдались в наших исследованиях). Из рисунков видно как соотносятся оба вида функций для сильно устойчивой и неустойчивой стратификации: область, которая формирует значение удельного потока в условиях устойчивой стратификации атмосферы, оказывается гораздо больше, чем в условиях неустойчивой стратификации.

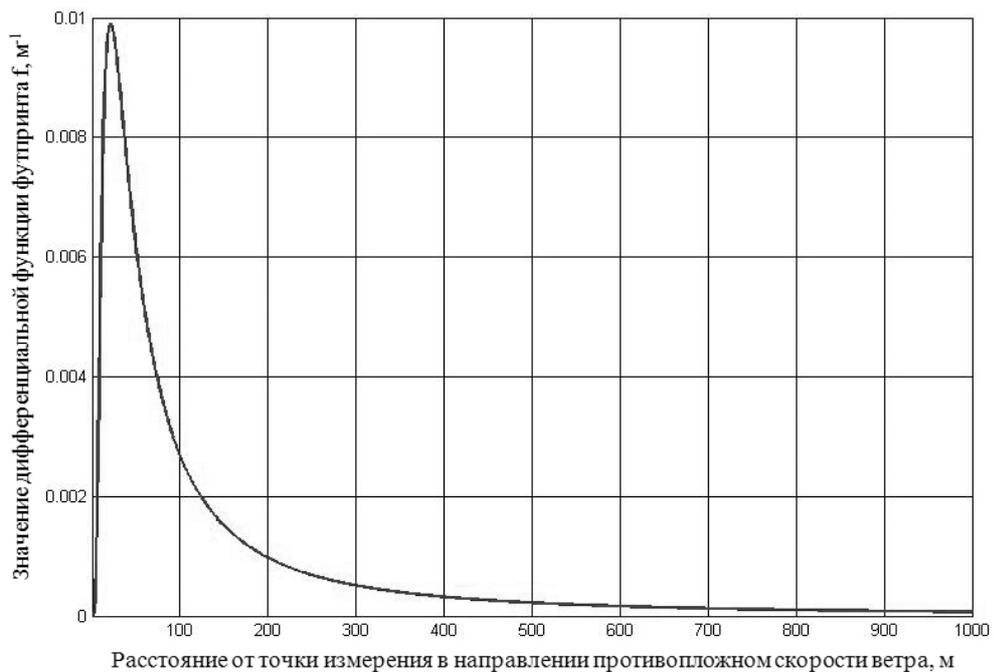


Рис. 7. Дифференциальная функция футпринта для скорости ветра 1.49 м с^{-1} (стратификация атмосферы – неустойчивая).

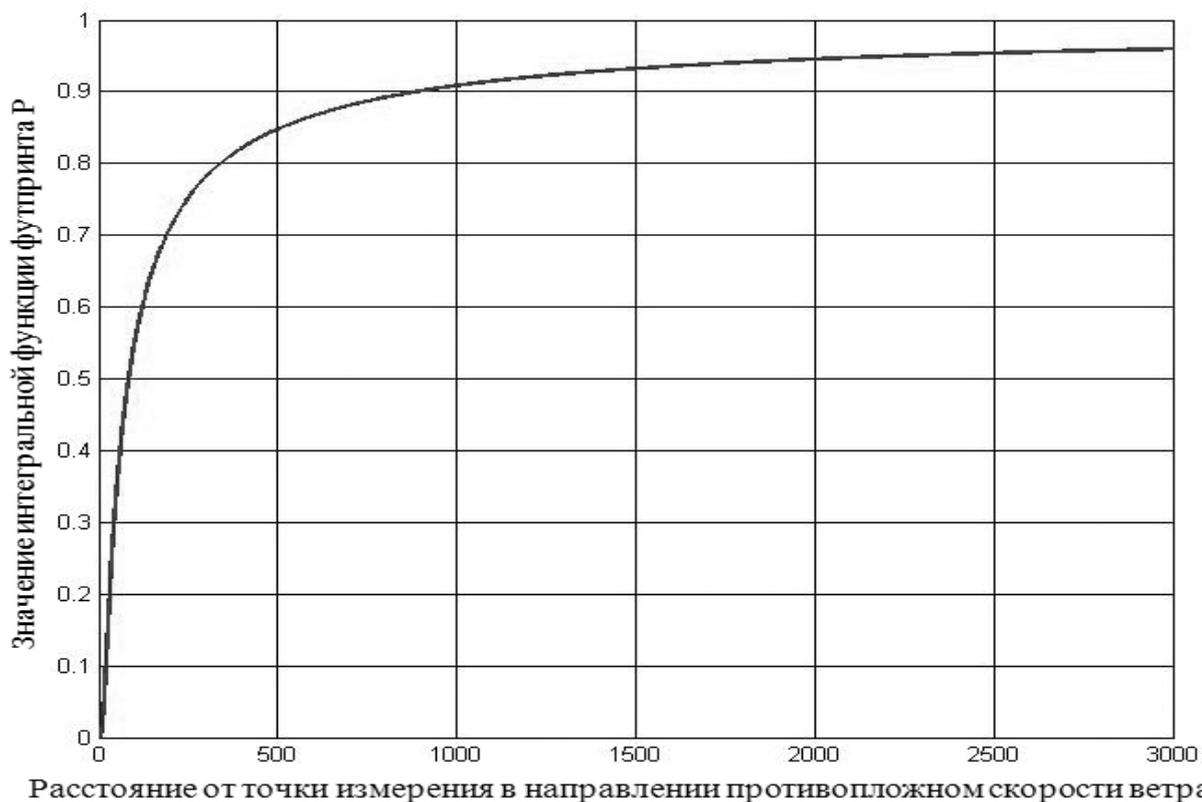


Рис. 8. Интегральная функция футпринта для скорости ветра 1.49 м с^{-1} (стратификация атмосферы – неустойчивая).

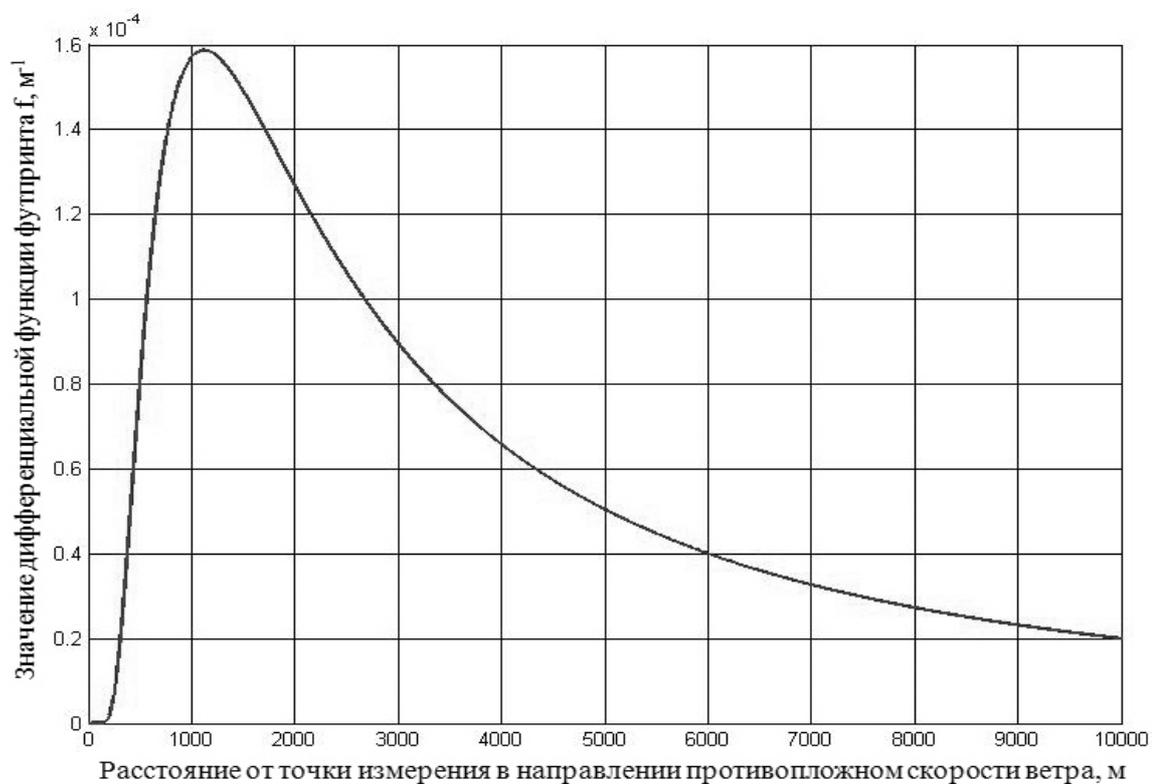


Рис. 9. Дифференциальная функция футпринта для скорости ветра 0.15 м с^{-1} (стратификация атмосферы – сильно устойчивая).

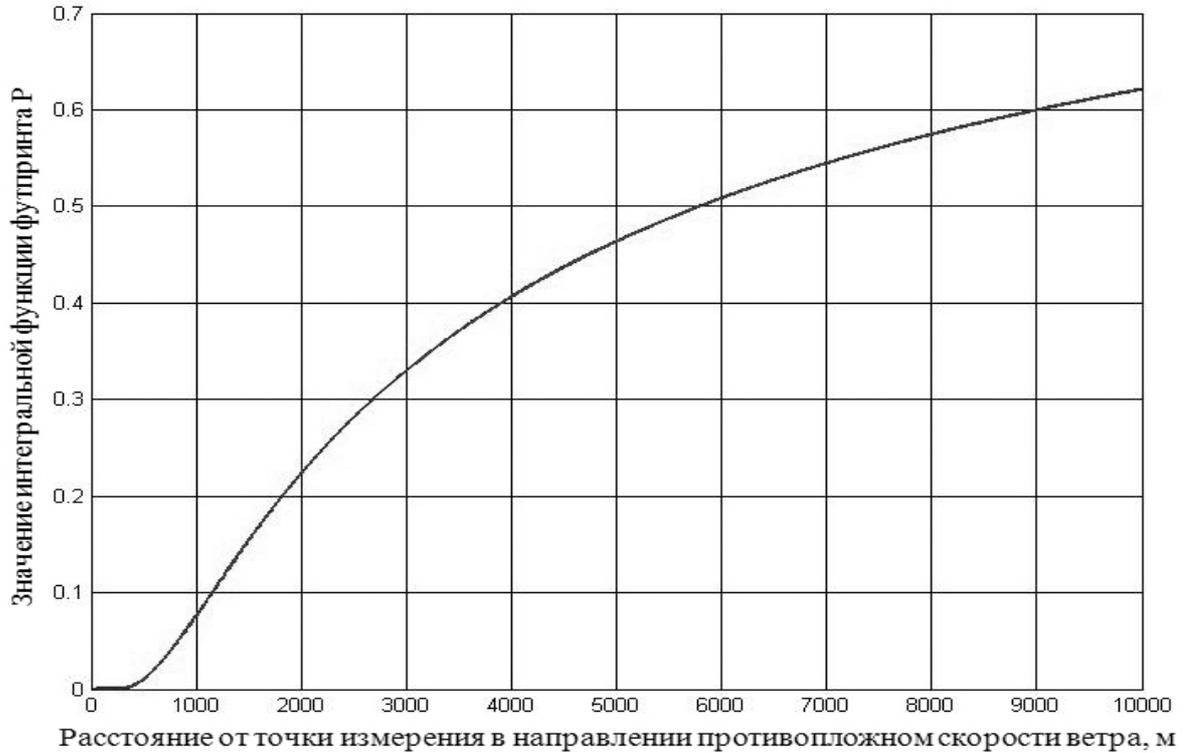


Рис. 10. Интегральная функция футпринта для скорости ветра 0.15 м с^{-1} (стратификация атмосферы – неустойчивая).

Так, для сильно устойчивой стратификации дифференциальная функция футпринта достигает максимума на расстоянии более 1000 м от точки измерений, в то время как в условиях неустойчивой стратификации максимум этой функции достигается на расстоянии около 30 м. Это связано с соотношением процессов турбулентной диффузии примеси в вертикальном направлении и адвекции в горизонтальном направлении, устанавливающимся в тот или иной промежуток времени.

Оценим, какие различия в величинах потока для рассматриваемых серий измерений могли быть вызваны разными областями влияния. Напомним, что во время измерений 10–11 августа направление ветра было юго-западным, а в серии 1–2 сентября – северо-западным. За величину области влияния будем принимать зону, ограниченную точками перегиба интегральной функции футпринта, как это предлагается в [61]. Для измерений 10–11 августа эта зона располагалась, начиная от 450 и заканчивая 5000 м от точки измерения, а для 1–2 сентября – от 20 до 120 м. Внутри указанных соответствующих зон выделяли для каждой серии измерений сектор, размах которого определялся колебаниями направления ветра, а в секторе вычленили три типа объектов (гряды, мочажины и топи), для каждого из которых камерно-статическим методом измерялась величина удельного потока CH_4 (результаты этих измерений приведены в [56]). Медиана значений удельного потока CH_4 для топей в 1.6 раза превышала таковую для мочажин, а она, в свою очередь, более чем на порядок превышала медиану для гряд (таким образом, потоком с гряд вообще можно пренебречь). Полученные для обоих секторов (с учетом доли площадей топей, мочажин и гряд) значения потока метана показали, что за счет разного направления ветра удельный поток при измерениях 1–2 сентября должен быть при прочих равных условиях на $0.41 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ больше, чем 10–11 августа.

Для оценки суммарной погрешности (Δ), вносимой различными видами ошибок (Δ_i), использовалась формула: $\Delta = (\sum \Delta_i^2)^{1/2}$ [53]. Вычисленная таким образом суммарная погрешность оказалась равна $0.64 \text{ мгС-CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Даже если к этому значению прибавить вариабельность, объясняемую различными зонами влияния в каждой серии

измерений ($0.41 \text{ мгС}-\text{CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$), этим не удастся объяснить всю разницу между полученными в обеих сериях значениями удельного потока. Таким образом, в различиях значений удельного потока, наблюдавшегося 10–11 августа и 1–2 сентября, вероятно, присутствует значимая «природная» составляющая, связанная с сезонной динамикой верхнего слоя температуры почвы и уровня болотных вод.

Авторам хотелось бы выразить особую благодарность профессору Югорского Государственного Университета д.б.н. Е.Д. Лапшиной за возможность работы на международном полевом стационаре «Мухрино» и предоставление некоторого необходимого оборудования. Также авторы признательны студентам МГУ им. М.В. Ломоносова И.Ю. и Н.В. Ошкиным за дружескую помощь и поддержку при проведении трудоёмких суточных измерений.

Кроме того авторы выражают признательность сотрудникам Лаборатории экологического приборостроения Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН А.И. Комарову и А.А. Кобзеву за помощь в поверке анемометра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г. *Углеродный обмен в криогенных экосистемах*. М.: Наука, 2008. 344 с.
2. Бородулин А.И., Десятков Б.Д., Махов Г.А., Сарманаев С.Р. Определение эмиссии болотного метана по измеренным значениям его концентрации в приземном слое атмосферы. *Метеорология и гидрология*. 1997. № 1. С. 66–74.
3. Mikaloff Fletcher S.E., Tans P.P., Bruhwiler L., Miller J.B., Heimann M. 2004. CH₄ sources estimated from atmospheric observations of CH₄ and its ¹³C/¹²C isotopic ratios : 1. Inverse modeling of source processes. *Global Biogeochem. Cycles*. V. 18. GB4004. doi:10.1029/2004GB002223.
4. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Ed. Houghton J.T, Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A. Cambridge Univ. Press, New York, 2001.
5. Fiore A.M., Jacob D.J., Field B.D., Streets D.G., Fernandes S.D., Jang C. Linking ozone pollution and climate change: The case for controlling methane. *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 19. doi:10.1029/2002GL015601.
6. Jones R.L., Pyle J.A. Observations of CH₄ and N₂O by the Nimbus 7 SAMS: A comparison with in situ data and two-dimensional numerical model calculations. *J. Geophys. Res.* 1984. № 89. P. 5263–5279.
7. Заварзин Г.А. *Лекции по природоведческой микробиологии*. М.: Наука, 2004. 367 с.
8. Denman K.L. *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed. Solomon D., White S. and Cameron A. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. Chapter 7. P. 499–588.
9. Lundegårdh H. Carbon Dioxide Evolution of Soil and Crop Growth. *Soil Science*. 1927. V. 23. Issue 6. P. 417–453.
10. Макаров Б.Н. Динамика газообмена между почвой и атмосферой в течение вегетационного периода под различными культурами севооборота. *Почвоведение*. 1952. № 3. С. 271–277.
11. Maksyutov S., Inoue G., Sorokin M., Nakano T., Krasnov O., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N., Vasiliev S. 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, 1999. P. 115–124.
12. Graf A., Weihermüller L., Huisman J.A., Herbst M., Bauer J., Vereecken H. Measurement depth effects on the apparent temperature sensitivity of soil respiration in field studies. *Biogeosciences*. 2008. V. 5. № 4. P. 1175–1188. URL:

- <http://www.biogeosciences.net/5/1175/2008/bg-5-1175-2008.pdf> (дата обращения: 29.12.2010).
13. Pape L., Ammann C., Nyfeler-Brunner A., Spirig C., Hens K., Meixner F.X. An automated dynamic chamber system for surface exchange measurement of non-reactive and reactive trace gases of grassland ecosystems. *Biogeosciences*. 2009. V. 6. № 3. P. 405–429. URL: <http://www.biogeosciences.net/6/405/2009/bg-6-405-2009.pdf> (дата обращения: 29.12.2010).
 14. Глаголев М.В., Головацкая Е.А., Шнырев Н.А. Эмиссия парниковых газов на территории Западной Сибири. *Сибирский экологический журнал*. 2007. Т. 14. № 2. С. 197–210.
 15. Глаголев М.В., Шнырев Н.А. Динамика летне-осенней эмиссии CH₄ естественными болотами (на примере юга Томской области). *Вестник МГУ*. 2007. № 1. С. 8–15. (*Сер. Почвоведение*).
 16. Глаголев М.В. Математическое моделирование метаноокисления в почве. *Труды Института микробиологии имени С.Н. Виноградского РАН. Вып. XIII: К 100-летию открытия метанотрофии*. Под ред. В.Ф. Гальченко. М.: Наука, 2006. С. 315–341.
 17. Healy R.W., Striegl R.G., Ressel T.F., Hutchinson G.L., Livingston G.P. Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil-atmosphere gas exchange: identification of physical processes. *Soil Science of America Journal*. 1996. V. 60. P. 740–747.
 18. Krasnov O., Maksyutov S., Shimoyama K., Suto H., Nadeev A., Shelevoi V., Glagolev M., Kosykh N., Machida T., Inoue G. Automatic chamber observations of methane and carbon dioxide fluxes at West Siberian wetland. *American Geophysical Union (Fall Meeting 2010)* 2010. Abstract #GC33A-0921. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AGUFMGC33A0921K> (дата обращения 03.01.2011).
 19. Moore T.R., Dalva M. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils. *Journal of Soil Science*. 1993. V. 44. P. 651–664.
 20. Chanton J.P., Whiting G.J., Happel J.D., Gerard G. Contrasting rates and diurnal patterns of methane emission from emergent aquatic macrophytes. *Aquatic Botany*. 1993. V. 46. P. 111–128.
 21. Morrissey L.A., Zobel D.B., Livingston G.P. Significance of stomatal control on methane release from Carex-dominated wetlands. *Chemosphere*. 1993. V. 26. № 1–4. P. 339–355.
 22. Glagolev M., Uchiyama H., Lebedev V., Utsumi M., Smagin A., Glagoleva O., Erohin V., Olenov P., Nozhevnikova A. Oxidation and Plant-Mediated Transport of Methane in West Siberian Bog. In: *Proceedings of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999*. Tsukuba: Isebu, 2000. P. 143–149.
 23. Sebacher D.I., Harriss R.C., Bartlett K.B. Methane flux across the air-water interface: air velocity effects. *Tellus*. 1983. V. 35B. P. 103–109.
 24. Holmes M.E., Sansone F.J., Rust T.M., Popp B.N. Methane production, consumption, and air-sea exchange in the open ocean: An evaluation based on carbon isotopic ratios. *Global Biogeochemical Cycles*. 2000. V. 14. № 1. P. 1–10.
 25. Kelley C.A., Jeffrey W.H. Dissolved methane concentration profiles and air-sea fluxes from 41°S to 27°N. *Global Biogeochemical Cycles*. 2002. V. 16. № 3. P. 1040. doi:10.1029/2001GB001809.
 26. Mori S., Prokushkin P., Oksana M., Kajimoto T., Zyryanova O., Abaimov A.P., Koike T., Matsuura Y., Ueda R. Daytime Whole-Tree Respiration under Controlled Air Temperature Utilizing Heat of Permafrost and Wood Fire in a Siberian Larch Forest.

- Proceedings of the Sixth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1997*. Tsukuba: Isebu, 1998. P. 11–17.
27. Pelletier L., Moore T.R., Roulet N.T., Garneau M., Beaulieu-Audy V. Methane fluxes from three peatlands in the La Grande Riviere watershed, James Bay lowland, Canada. *Journal of Geophysical Research*. 2007. V. 112. G01018. doi: 10.1029/2006JG000216.
 28. Chen H., Wu N., Gao Y., Wang Y., Luo P., Tian J. Spatial variations on methane emissions from Zoige alpine wetlands of Southwest China. *Science of the total environment*. 2009. V. 407. P. 1097–1104.
 29. Baldocchi D.D., Hicks B.B., Meyers T.P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*. 1988. V. 69. P. 1331–1340.
 30. Inoue G., Makshyutov S. Application of Conditional Sampling Eddy Flux Measurement in West Siberia Lowland. *Proceedings of the Second Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1993*. Tsukuba: Isebu, 1994. P. 83–85.
 31. Сеттон О.Г. Микрометеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1958. С. 9.
 32. Глаголев М.В. К методу «обратной задачи» для определения поверхностной плотности потока газа из почвы. *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 2010. Т. 1. № 1. С. 17–36. URL: http://www.ugrasu.ru/international/unesco/journal/content/2010_1/documents/Glagolev.pdf (дата обращения: 30.07.2010)
 33. Topp E., Pattey E. Soils as sources and sinks for atmospheric methane. *Canadian Journal of Soil Science*. 1997. V. 77. P. 167–178.
 34. Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клер Ч., мл. *Некорректные обратные задачи теплопроводности*. М.: Мир, 1989. 312 с.
 35. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. *Вычислительные методы для инженеров*. М.: Высшая школа, 1994. 544 с.
 36. Schmidt H.P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2002. V. 113. P. 159–183.
 37. Soegaard H., Nordstroem C., Friborg T, Hansen B.U., Christensen T.R., Bay C. Trace gas exchange in a high-arctic valley. 3. Integrating and scaling CO₂ fluxes from canopy to landscape using flux data, footprint modeling, and remote sensing. *Global Biogeochem. Cycles*. 2000. V. 14. № 3. P. 725–744.
 38. Fan S.M., Wofsy S.C., Bakwin P.S., Jacob D.J., Anderson S.M., Keabian P.L., McManus J.B., Kolb C.E. Micrometeorological Measurements of CH₄ and CO₂ Exchange Between the Atmosphere and Subarctic Tundra. *Journal of Geophysical Research*. 1992. V. 97. № D15. P. 16627–16643.
 39. Simpson I.J., Edwards G.C., Thurtell G.W., den Hartog G., Neumann H.H., Staebler R.M. Micrometeorological measurements of methane and nitrous oxide exchange above a boreal aspen forest. *Journal of Geophysical Research*. 1997. V. 102. № D24. P. 29331–29341.
 40. Beswick K.M., Simpson T.W., Fowler D., Choularton T.W., Gallagher M.W., Hargreaves K.J., Sutton M.A., Kaye A. Methane emissions on large scales. *Atmospheric Environment*. 1998. V. 32. № 19. P. 3283–3291.
 41. Kormann R., Meixner F.X. An analytical footprint model for non-neutral stratification. *Boundary-Layer Meteorology*. 2001. V. 99. P. 207–224.
 42. Клепцова И.Е., Глаголев М.В., Филиппов И.В., Максюттов Ш.Ш. Эмиссия метана из рямов и гряд средней тайги Западной Сибири. *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 2010. № 1. С. 66–76. URL: www.ugrasu.ru/international/unesco/journal/content/2010_1/documents/Klepzova.pdf (дата обращения: 30.07.2010).
 43. Bleuten W., Filippov I. В: *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*: Сборник научных трудов кафедры ЮНЕСКО Югорского

- государственного университета. Вып. 1. Под ред. Глаголева М.В., Лапшиной Е.Д. Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т, 2008. С. 208–224. URL: <http://www.ugrasu.ru/international/unesco/publications/journal/documents/Sbornic.pdf> (дата обращения: 20.06.2011).
44. Hutchinson G.L., Mosier A.R. Improved soil cover method for field measurement of nitrous-oxide fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1981. V. 45. P. 311–316.
 45. Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сирин А.А. Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области). *Агрохимия*. 2008. № 5. С. 46–58.
 46. Берлянд М.Е. *Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы*. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 290 с.
 47. *Физические величины. Справочник*. Под ред. Григорьева И.С. и Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
 48. Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. *Физикохимия и биология торфа. Методы измерения газообмена на границе почва-атмосфера*. Томск: ТГПУ, 2010. 104 с.
 49. Zilitinkevich S., Esau I. Similarity theory and calculation of turbulent fluxes at the surface for the stably stratified atmospheric boundary layers. *Boundary-Layer Meteorology*. 2007. V. 125. P. 193–205.
 50. Zilitinkevich S.S., Esau I., Kleorin N., Rogachevskii I., Kouznetsov R.D. On the Velocity Gradient in Stably Stratified Sheared Flows. Part 1: Asymptotic Analysis and Applications. *Boundary-Layer Meteorology*. 2010. V. 135. P. 505–511. doi: 10.1007/s10546–010–9488–x.
 51. Эберт К., Эдерер Х. *Компьютеры. Применение в химии*. М.: Мир, 1988. 416 с.
 52. Treat C.C., Bubier J.L., Varner R.K., Crill P.M. Timescale dependence of environmental and plant-mediated controls on CH₄ flux in a temperate fen. *Journal of Geophysical Research*. 2007. V. 112. P. G01014. doi: 10.1029/2006JG000210.
 53. Skeel R.D. and Berzins M. A Method for the Spatial Discretization of Parabolic Equations in One Space Variable. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*. 1990. V. 1. P. 1–32.
 54. Химмельблау Д. *Анализ процессов статистическими методами*. М.: Мир, 1973. 957 с.
 55. Румшицкий Л.З. *Математическая обработка результатов эксперимента*. М.: Наука, 1971. 192 с.
 56. Сабреков А.Ф. О связи суточной динамики концентрации метана над болотом с коэффициентом диффузии. *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 2010. Т. 1. № 2.
 57. *Атмосфера*. Под ред. Седунова Ю.С. Л.: Гидрометеиздат, 1991.
 58. Sabrekov A.F., Kleptsova I.E., Glagolev M.V., Maksyutov Sh.Sh., Machida T. Methane emission from middle taiga oligotrophic hollows of Western Siberia. *Вестник ТГПУ*. 2011. Вып. 5. С. 135–143. URL: http://vestnik.tspu.ru/files/PDF/articles/sabrekov_a_f_135_143_5_107_2011.pdf (дата обращения: 19.07.2011).
 59. Glagolev M., Inisheva L., Lebedev V., Naumov A., Dement'eva T., Golovatskaja E., Erohin V., Shnyrev N., Nozhevnikova A. 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: Kohsoku Printing Center, 2001. P. 112–119.
 60. Глаголев М.В. Температурный гистерезис потока метана из почвы. «Биология – наука XXI века»: 6-я Пуцинская школа-конференция молодых учёных. Тула: Изд-во гос. пед. ун-та им. Л.Н. Толстого, 2002. Т. 3. С. 97–98.

61. Horst T.W., Weil J.C. How far is far enough – the fetch requirements for micrometeorological measurement of surface fluxes. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 1994. V. 11. P. 1018–1025.

Материал поступил в редакцию 21.11.2011, опубликован 26.01.2012.