

УДК 631.433.3

УДЕЛЬНЫЕ ПОТОКИ МЕТАНА ИЗ ЭКОСИСТЕМ ЮЖНОЙ ТУНДРЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Кривенко Л.А.¹⁾, Глаголев М.В.^{1,2,3)}, Фастовец И.А.¹⁾, Смоленцев Б.А.⁴⁾, Максютлов Ш.Ш.⁵⁾

¹⁾Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Россия)

²⁾Институт лесоведения РАН, с. Успенское Московской обл. (Россия)

³⁾Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск (Россия)

⁴⁾Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск (Россия)

⁵⁾National Institute for Environmental Studies, г. Цукуба (Япония)

m_glagolev@mail.ru

В период с 28 июля по 5 августа 2013 года были проведены измерения эмиссии метана в подзоне южной тундры Западной Сибири статическим камерным методом. Отбор образцов осуществлялся в Тазовском районе Ямало-Ненецкого автономного округа в 12 км к юго-юго-западу от поселка Тазовский в наиболее типичных для данного региона болотных экосистемах: хасыряях, полигональных, олиготрофных и мезотрофных болотах, плоскобугристых комплексах, а также в незаболоченной тундре. Наибольшие значения удельных потоков метана были зарегистрированы в мезотрофных болотах (медиана 2.75, нижний и верхний квартили 0.12 и 4.78 мгСН₄·м⁻²·ч⁻¹ соответственно) и мочажинах плоскобугристого комплекса (медиана 0.79, нижний квартиль 0.37, верхний квартиль 1.28 мгСН₄·м⁻²·ч⁻¹). Наименьшими значениями характеризовались минеральные почвы незаболоченной тундры, где медиана, нижний и верхний квартили составили -0.05, -0.01 и 0.11 мгСН₄·м⁻²·ч⁻¹, соответственно. Полученные данные в будущем могут быть использованы для оценки региональных потоков метана из тундры, а также их влияния на общий баланс парниковых газов в атмосфере.

Ключевые слова: эмиссия метана, болотные экосистемы, суходольные участки.

Цитирование: Кривенко Л.А., Глаголев М.В., Фастовец И.А., Смоленцев Б.А., Максютлов Ш.Ш. 2014. Удельные потоки метана из экосистем южной тундры Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 5. № 1(9). С. 26-42.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема изменений климата на планете является одной из важнейших для современного человечества. По данным IPCC на 2013 год (см. [Ciais et al., 2013]), увеличение приземных температур отмечается по всему земному шару, наблюдается рост уровня Мирового океана и снижение протяженности снежного и ледового покрова, а также уменьшение площади сезонно промерзающего грунта. Но даже если и считать имеющийся массив данных недостаточным для доказательства самого явления глобального потепления, нельзя пренебрегать необходимостью заблаговременных исследований климатических изменений на планете с целью предупреждения возможных последствий.

Отмеченные глобальные климатические изменения связаны в первую очередь с аномальным усилением явления парникового эффекта, обусловленного увеличением концентраций парниковых газов в атмосфере. Одним из важнейших среди них является метан. Известно, что молекула СН₄ в десятки раз эффективнее поглощает инфракрасное излучение, чем молекула углекислого газа [Кароль и Киселев, 2004, с. 47], но, с другой стороны, время жизни в атмосфере Земли у метана меньше, чем у СО₂, а его концентрация относительно мала по сравнению с концентрацией СО₂, поэтому вклад метана в парниковый эффект составляет лишь 15% (против 60% для СО₂) [Rodhe, 1990]. В то же время, сокращение выбросов метана на определенную величину даст больший результат, чем сокращение выбросов СО₂ на такую же величину. По состоянию на 2011 год концентрация метана в атмосфере (1803 ± 4 ppb) существенно превышает верхний предел естественного диапазона изменения концентрации СН₄ на протяжении последних 800 000 лет и продолжает повышаться в среднем на 2.2 ppb в год [Ciais et al., 2013].

Основным естественным источником метана являются болота и заболоченные земли [Khalil and Shearer, 2000, p. 98; Ciais et al., 2013]. Уже относительно давно стало ясно, что долгосрочное прогнозирование климатического эффекта малых парниковых газовых составляющих атмосферы

невозможно без знания распределения наземных источников и стоков [Минько, 1988]. Точное измерение потоков метана должно сыграть существенную роль для предсказания атмосферной концентрации CH_4 и его влияния на климат [Cao et al., 1996].

К настоящему времени регионом России, где эмиссия метана из болот наиболее подробно изучена, является Западная Сибирь. Начиная с 1993 г. во всех природных зонах Западной Сибири было выполнено несколько тысяч измерений удельных потоков (УП) CH_4 – см., например, [Паников и др., 1993; Глаголев и Смагин, 2006; Repo et al., 2007; Глаголев и Клепцова, 2009]. Однако величины удельных потоков метана из почв тундры Западной Сибири до недавнего времени оставались гораздо менее изученными (результаты эпизодических измерений см., например, в [Глаголев и др., 2010; Сабреков и др., 2011; Голубятников и Казанцев, 2013]).

В Западной Сибири площадь болотных почв тундры почти в 6 раз меньше по сравнению с таежной зоной и составляет около 2.7% от общей площади Западной Сибири (площадь Западной Сибири составляет приблизительно 2.5 млн. km^2) [Природные условия..., 1963], годовой радиационный баланс в тундровой зоне вдвое меньше, чем в таежной, а годовая продуктивность фитомассы – практически втрое [Кутилин и др., 2004] (см. табл. 1). В южной тундре Западной Сибири болота и заболоченные земли занимают 106.6 тыс. km^2 [Вомперский и др., 2005, с. 47]. Средняя температура воздуха в июле-августе в Тазовском (район проведения измерений летом 2013 г., подзона южной тундры; здесь и далее отнесение территорий к природным зонам – согласно [Гвоздецкий и Михайлов, 1970]), по данным за 2009-2013 гг. включительно составила 12.7 °C, а среднее количество осадков – 58.6 мм. Для сравнения, в селе Бакчар (подзона южной тайги) средняя температура воздуха и количество осадков в июле-августе по данным за 2008, 2010-2013 гг.¹ составили 16.3 °C и 73.2 мм, соответственно. Как видим, количество осадков в тундре меньше на 16.4 мм, а температура в среднем ниже на 3.6 градусов [Федеральная служба...].

a)

b)

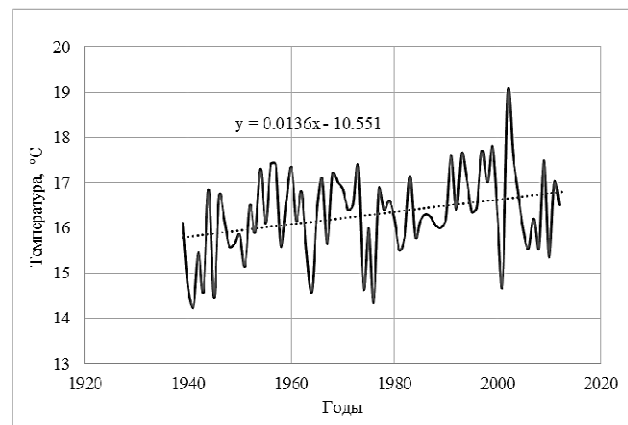
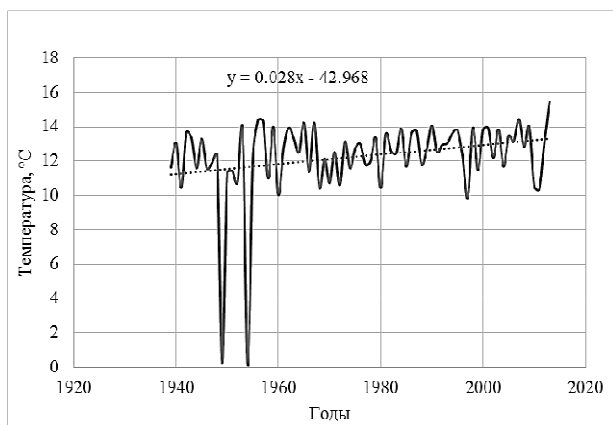


Рис.1. Возрастание температуры июля-августа. Temperature increase of July-August: a) в Тазовском / at Tazovsky; b) в Бакчаре / at Bakchar.

Известно, что температура заметно влияет на эмиссию метана [Паников и др., 1993; Augustin et al., 1996; Глаголев и Смагин, 2006; Stepanenko et al., 2011]: при увеличении на 10 градусов по правилу Вант-Гоффа эмиссия должна возрастать в 2-4 раза. Теперь проанализируем данные по средней температуре воздуха в пос. Тазовском в июле-августе (период наибольшей эмиссии метана) за 1939-2013 годы [Федеральная служба...]. Как видим, температура воздуха за этот период возросла на 2.072 °C, и, если выделить линейный тренд, получим, что скорость возрастания составляет 0.028 °C·год⁻¹ (см. рис. 1а). Выделим линейный тренд температуры в Бакчаре (рис. 1б). Несложно заметить, что температура здесь также увеличивается со временем, но с меньшей скоростью, которая составляет 0.014 °C·год⁻¹. При этом в зоне южной тайги наблюдается на порядок большая эмиссия метана, чем в тундре (так, по данным, приведенным в [Глаголев, 2008], поток из южной тайги Западной Сибири составляет 1.5 Мт/год, в то время как для тундры – лишь 0.3 Мт/год).

Из вышеизложенного понятно, что болота южной тайги отличаются в несколько раз большими значениями потоков метана и большей занимаемой площадью по сравнению с южной тундрой, поэтому здесь может быть лучше отслежено увеличение регионального потока метана, чем в

¹ За 2009 г. нам не удалось найти данные в открытом доступе.

тундровых экосистемах. Однако атмосфера в зоне южной тундры теплеет вдвое быстрее, чем в южной тайге, соответственно, увеличение УП метана со временем в некоторых экосистемах здесь может оказаться гораздо более ощутимым. В связи с этим сбор и анализ данных на северных территориях России важен для полной характеристики их вклада в общую эмиссию метана.

Целью цикла наших исследований является изучение вклада тундры в глобальную эмиссию метана с территории Западной Сибири, для чего в настоящей работе были поставлены и реализованы следующие задачи: 1) измерение удельных потоков метана из различных экосистем болот и суходольных участков в южной тундре Западной Сибири; 2) их систематизация вместе с УП, измеренными в этой подзоне ранее. Поскольку в природе практически все параметры имеют некоторое вероятностное распределение, а не одно единственное значение, то в рамках первой задачи была выделена подзадача корректного восстановления плотности распределения вероятности удельных потоков CH_4 в тех или иных экосистемах тундры Западной Сибири.

Таблица 1. Характеристики зон тундры и тайги [Природные условия..., 1963; Кутилин и др., 2004]

Table 1. Characteristics of tundra and taiga zones

Географическая зона / Geographic zone	Годовой радиационный баланс, $\text{kcal}\cdot\text{cm}^{-2}$ / Annual radiation balance, $\text{kcal}\cdot\text{cm}^{-2}$	Годовое валовое увлажнение, мм / Annual gross hydration, mm	Годовая продуктивность фитомассы, $\text{t}\cdot\text{ga}^{-1}$ / Annual plant biomass production, $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$	Потребление химических элементов растениями, $\text{t}\cdot\text{ga}^{-1}$ / Chemical elements consumption by plants, $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$	Площадь, тыс. km^2 / Square, 10^3 km^2	
					общая / total	болотных почв / of wetlands
Тундра	15	240	2.5	0.11	310.0	60.8
Тайга	30	370	7	0.25	1420	390

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб проходил в Тазовском районе Ямало-Ненецкого автономного округа (подзона южной тундры) в конце июля - начале августа 2013 г. в 12 км к ЮЮЗ от поселка Тазовский. Исследовательские полигоны выбирались таким образом, чтобы получить данные для наиболее типичных экосистем изучаемой территории.

Были выделены следующие объекты (в качестве определений использовались термины из [Усова, 2009], если не указан иной источник):

- **Сухая тундра** (незаболоченная тундра, суходольные участки). Были изучены точки на заросшем ивой (*Salix sp.*) склоне к водотоку (тт. 5-1 и 5-2), а также на ровном участке кустарничково-лишайниково-сфагнуовой тундры (тт. 3-1). Разрез, заложенный на суходоле (67.37373° с.ш., 78.61897° в.д.), вскрыл на микроповышении глеезём типичный, а в микропонижении – торфяно-глеезём типичный (согласно классификации [Шишов и др., 2004]).

- **Плоскобугристые комплексы.** На буграх преобладает лишайниково-кустарничковая растительность, в мочажинах – сфагнуво-пушицево-осоковая. Тт. 17-1 и 17-2 соответствуют комплексу с примерно равным соотношением бугров и мочажин, а тт. 17-3 и 17-4 лежат в более влажной зоне близ небольшого озера (бугры составляют около 30% этого комплекса).

- **Мезотрофное болото.** Сильно обводненный сфагнуво-осоково-пушицевый центр комплекса в т. 10-2 и более сухой участок с аналогичной растительностью в т. 10-3.

- **Олиготрофное болото,** преимущественно сфагнуво-осоковое.

- **Полигональное болото.** Отбор осуществлялся на валиках и на полигоне, в том числе в центральной сильно-заболоченной его части.

- **Хасырей.** Открытое болото в спущенном озере согласно [Lapshina et al., 2007]. Преобладает сфагнуво-пушицевая растительность в тт. 14-1 и 14-4 (более поздняя стадия развития, обозначенная как древний хасырей), осоковая – в т. “khas”, сфагнуво-хвощевая – в т. 11-1 и сфагнуво-осоковая – в т. 11-3.

Несколько измерений проводилось также и на участке перехода плоскобугристого комплекса к мезотрофному болоту (тт. 10-1 и 10-4); по растительности комплекс аналогичен мезотрофному.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Удельные потоки метана определяли при помощи статического камерного метода, как было описано ранее в [Глаголев и Смагин, 2006; Глаголев и Суворов, 2007; Глаголев и Шнырев, 2008]; по две камеры устанавливали на повышения и понижения микрорельефа, при наличии таковых в данной экосистеме. Пробы отбирали каждые 20 минут в течение часа, после чего камеру проветривали и вновь устанавливали на основание. В каждой камере измерения выполняли в четырех повторностях. Для того, чтобы получить более репрезентативную выборку значений УП, в двух точках (т. 3-1 в сухой тундре и т. “bog-day” на плоскобугристом болоте) удельные потоки измеряли в течение полных суток каждые два часа. Пробы газа отбирали и хранили в пластиковых шприцах объемом 10 или 20 мл.

На каждой точке фиксировали глубину залегания мерзлого слоя и уровень болотных вод. Температурный профиль измеряли электронными датчиками «THERMOCHRON» DS 1922L iButton® («DALLAS Semiconductor», США).

Для предотвращения потерь CH_4 шприцы с пробами хранили в воде и в насыщенном растворе NaCl. Концентрация газа в пробах измерялась на хроматографе «Кристалл 5000-2» («Хроматэк», Йошкар-Ола). Для калибровки использовали смеси газов метан/воздух с концентрацией CH_4 0.49 ± 0.07 , 5.30 ± 0.5 и 10.30 ± 0.6 ppm (ООО «Мониторинг», Санкт-Петербург).

Удельные потоки вычисляли методом линейной регрессии (в координатах время – концентрация) в случае выделения метана и нелинейной – при его поглощении [Глаголев и Суворов, 2007]. Как это обычно принимается в работах по исследованию эмиссии газов, положительные УП соответствуют выделению метана в атмосферу, отрицательные – его поглощению.

Для построения вероятностных распределений плотностей потоков в тех или иных экосистемах использовали функцию ksdensity из Statistics Toolbox (Matlab 7.12.0). Описание математического принципа, который использует данная функция см. в Приложении 1. Указанную функцию вызывали с двумя аргументами, в качестве которых использовали удельные потоки метана и их статистические «веса» (вес потока принимался обратно пропорциональным квадрату стандартной ошибки его измерения). Множественную регрессию проводили в программе Statistica 8.0.550.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Удельные потоки метана и влияние на них факторов окружающей среды

Полученные значения УП для различных экосистем и соответствующие им условия (температуры на различных глубинах, растительность, глубина протаивания и т.д.) приведены в табл. П1-П4 Приложения 2, суточные измерения на участках незаболоченной тундры вынесены в табл. П5 и графически представлены на рис. 2. Как видно из данного рис., закономерной суточной динамики УП метана не наблюдается.

Для того, чтобы получить более четкую картину эмиссии метана из экосистем рассматриваемой подзоны приведем некоторые статистические параметры (см. табл. 2) для всего массива УП, объединяющего как результаты, полученные нами в данной работе, так и опубликованные для аналогичных экосистем ранее в [Глаголев и др., 2010; Сабреков и др., 2011]. Согласно данным табл. 2, наибольшие УП наблюдаются в мочажинах плоскобугристых комплексов, а также в мезотрофных болотах.

Отрицательные УП обнаружены в точках с минеральными почвами («сухая» тундра). Вероятно, это связано с аэробными условиями среды, не подходящими для деятельности метаногенов. Кроме того, низкая влажность почвы на данных участках может способствовать потреблению CH_4 метаноокисляющими бактериями, как показано, например, в [Whalen et al., 1990; Adamsen and King, 1993; Augustin et al., 1996]. Adamsen and King [1993] для возвышенных участков в тундре (Канада) продемонстрировали, что поглощение метана находится на уровне около $0.125 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Похожие значения поглощения ($0.113 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) наблюдались также в тундре Аляски на острове Уналяска (Алеутские острова) [Whalen and Reeburgh, 1990], что примерно соответствует нашим максимальным значениям (и это неудивительно, если учесть, что наши исследования выполнялись намного севернее). Сравнимые с нашими значения сообщались в [King et al., 1989] для тундры северного склона Аляски (представленные в этом источнике значения поглощения метана составляли 0.05 и $0.025 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$).

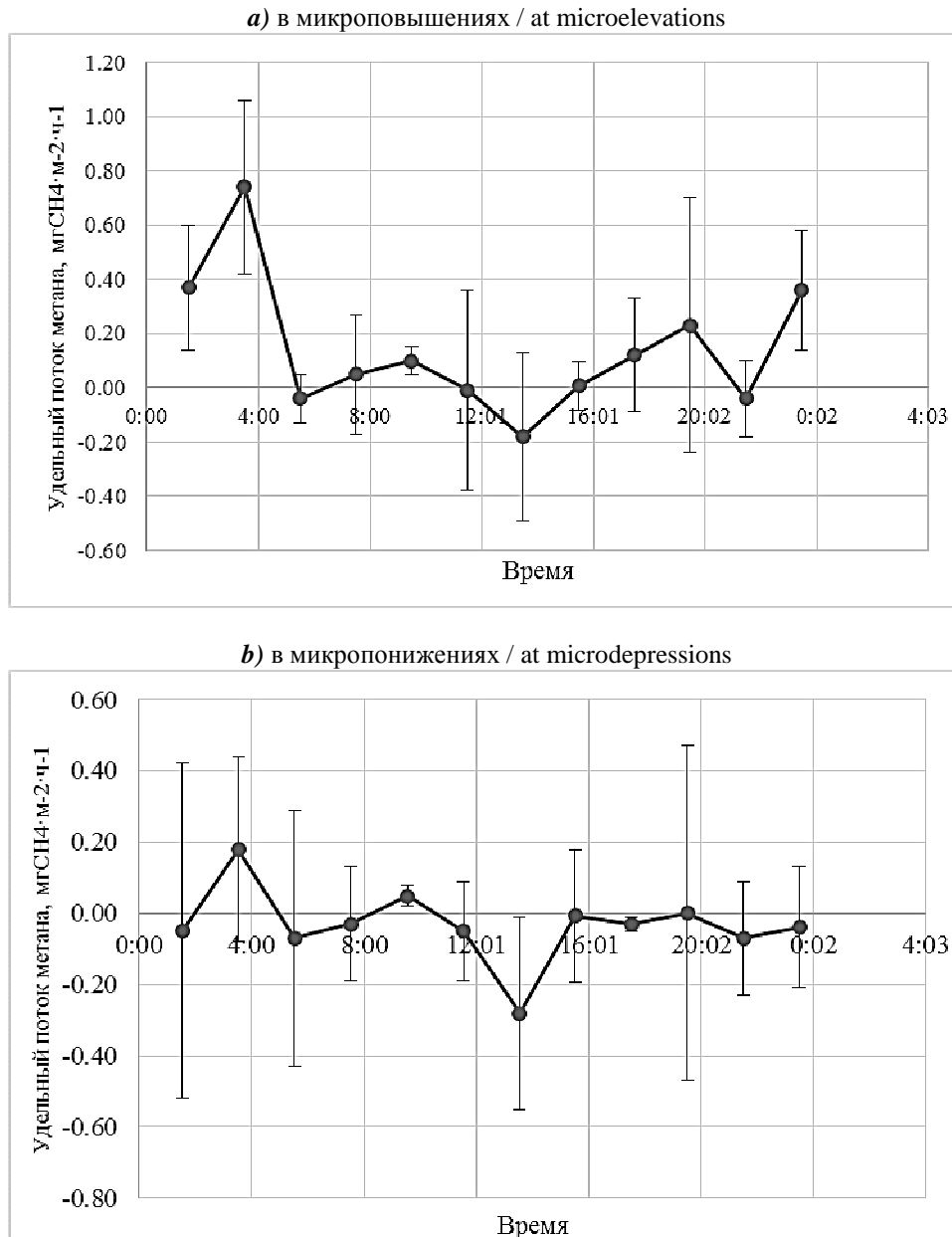


Рис. 2. Суточная динамика УП / Daily dynamics of fluxes.

Для общей выборки данных УП подзоны южной тундры была проведена множественная регрессия, которая выявила статистически значимую (при $p < 0.05$) зависимость удельного потока метана (УП, $\text{мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) от уровня болотных вод (УБВ, см от поверхности вглубь почвы):

$$\text{УП} = 0.267 - 0.002 \cdot \text{УБВ}.$$

Графически разброс значений УП СН_4 в зависимости от уровня стояния болотных вод отражен на рис. 3. Так как продуцирование метана осуществляется в строго анаэробных условиях в торфе ниже УБВ [см., например, Kettunen et al., 1993; Глаголев и Смагин, 2006], то, казалось бы, с приближением УБВ к поверхности, и тем более, при стоянии воды над поверхностью, эмиссия должна возрастать. Однако на рис. 3 очевидно снижение УП при УБВ от 10-20 см над поверхностью. Отмеченное здесь явление подробно описано в [Глаголев, 2012]. Там указано, что причиной подобного снижения эмиссии может служить, в частности, возможное затруднение физического перемещения метана к поверхности за счет высоких УБВ, а также его окисление в аэробной среде.

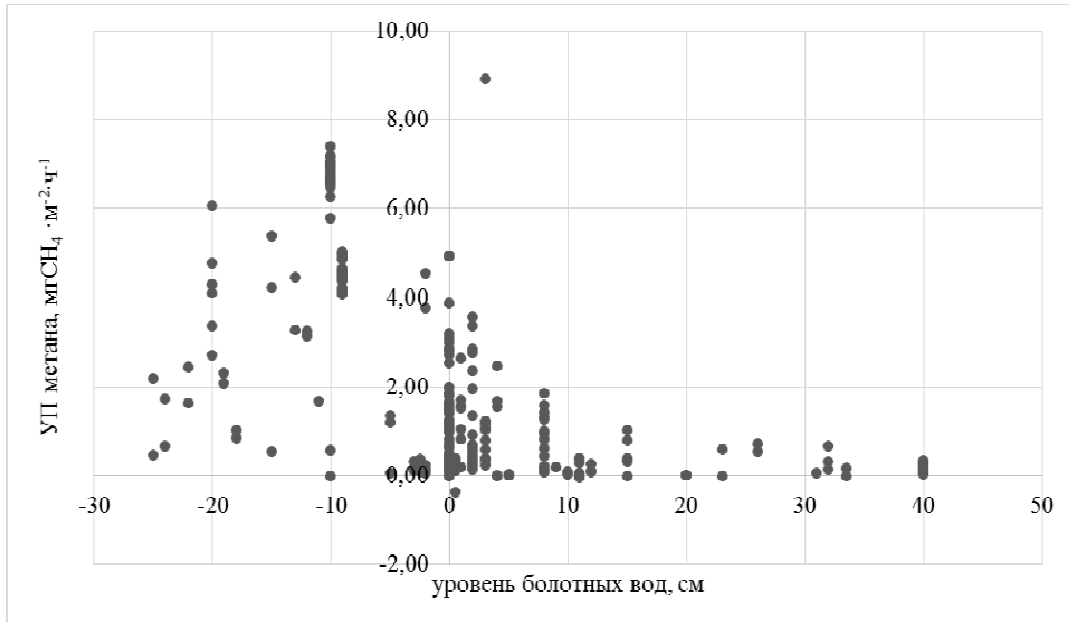


Рис. 3. Зависимость УП метана от УБВ / The dependence of methane fluxes from water table level.

Как показано в [Nakayama and Akiyama, 1994], влияние уровня протаивания сказывается следующим образом: чем этот уровень больше, тем интенсивнее эмиссия. Однако в нашем случае для УП статистически значимой зависимости от глубины протаивания не было обнаружено. Возможно, это было связано с относительно небольшим диапазоном значений глубин протаивания на выбранных нами точках.

Таблица 2. Статистические параметры распределений УП метана с различных болотных экосистем
Table 2. Statistical characteristics of methane fluxes' arrangements from various wetlands ecosystems

<i>Экосистема / Ecosystem</i>	<i>Удельный поток метана, мгСН₄·м⁻²·ч⁻¹ / Methane flux, mgCH₄·m⁻²·h⁻¹</i>		
	<i>Нижний квартиль / Lower quartile</i>	<i>Медиана / Median</i>	<i>Верхний квартиль / Upper quartile</i>
Плоскобугристый комплекс: мочажины / Palsa: hollows	0.37	0.79	1.28
Плоскобугристый комплекс: бугры / Palsa	0.05	0.11	0.33
Мезотрофное болото / Mesotrophic bog	0.12	2.75	4.78
Олиготрофное болото / Oligotrophic bog	-0.01	0.06	0.33
Полигональная тундра (валики и полигоны в совокупности) / Polygonal tundra	0.09	0.14	0.15
Хасырей / Khasyrey	0.14	0.22	0.52
Сухая тундра / Dry tundra	-0.05	-0.01	0.11

Вероятностные распределения удельных потоков метана

На рис. 4а-с представлены вероятностные распределения УП метана для соответствующих типов экосистем, полученные при помощи MATLAB-функции `ksdensity`. Распределения для бугров плоскобугристого комплекса, олиготрофных болот и хасыреев визуально похожи на логнормальные. Для мезотрофных болот вероятность возникновения высоких потоков больше, чем для остальных экосистем, где она близка к 0. Также, несмотря на более высокую вероятность возникновения отрицательных УП для мезотрофных болот, медиана УП с этой экосистемы составляет $2.75 \text{ мгСН}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, что также обусловлено ненулевой вероятностью появления больших УП. Распределение УП с мочажин плоскобугристого комплекса также приближено к логнормальному, но имеет гораздо менее выраженный максимум вероятности. Наконец, в полигональной тундре наблюдаем несколько максимумов распределения. Это может быть связано с тем, что распределение построено для УП как с самих полигонов, так и с валиков, где эмиссия менее интенсивна. Однако, к сожалению, говоря о вероятностных распределениях УП, нельзя быть уверенным в том, что нам удалось восстановить именно такое распределение, которое имеет место в природе.

С математической точки зрения постановка любой задачи включает в себя задание множества допустимых входных данных Φ и множества возможных решений Π . Цель вычислительной задачи состоит в нахождении решения $p \in \Pi$ по заданным входным данным $F \in \Phi$. Вычислительная задача называется корректной (по Адамару-Петровскому), если выполнены следующие требования (в том случае, когда хотя бы одно из нижеперечисленных требований не выполнено, задача называется некорректной) [Амосов с соавт., 1994, с. 44]:

- 1) решение задачи существует при любых входных данных $F \in \Phi$;
- 2) это решение единственно;
- 3) решение устойчиво по отношению к малым возмущениям входных данных (отсутствие устойчивости означает, что малым погрешностям входных величин F могут соответствовать сколь угодно большие возмущения идентифицируемого элемента p [Мацевитый и Лушпенко, 1990]).

Согласно известному определению, плотность вероятности (p) представляет собой производную:

$$p(x) = dF(x)/dx,$$

где $F(x)$ – функция распределения случайной величины x [Лапко с соавт., 2000: с. 32]. Если вычислять плотность распределения согласно этому определению, то необходимо будет дифференцировать эмпирическую функцию распределения. Существует и другой подход к задаче. Интегрируя вышеприведенное определение можно получить интегральное уравнение, которому должны удовлетворять функции распределения и плотности распределения.

Задача нахождения производной 1-го порядка $p(x)$ от функции $F(x)$ такой, что $F(0) = 0$, сводится к решению относительно $p(x)$ интегрального уравнения 1-го рода [Тихонов и Арсенин, 1979, с. 18-19]:

$$\int_0^x p(\tau) d\tau = F(x).$$

Некорректность задач численного дифференцирования и решения интегральных уравнений 1-го рода хорошо известна и подробно разъяснялась в литературе (см., например, [Калиткин, 1978: с. 82, 462-464; Тихонов и Арсенин, 1979: с. 9, 11-13, 18]). Возможность определения приближенных решений некорректно поставленных задач, устойчивых к малым изменениям исходных данных, основывается на использовании дополнительной информации [Тихонов и Арсенин, 1979, с. 37].

Из методов непараметрического восстановления плотности распределения на сегодняшний день, пожалуй, наиболее популярным является так называемый «ядерный метод» (см. Приложение 1). В частности, именно этот метод реализован в системе MATLAB, где ему соответствует функция `ksdensity`.

По сути дела, данный метод в качестве дополнительной информации использует представления о том [Лагутин, 2007, с. 388-392]

- А) какая конкретно функция используется в качестве ядра (иными словами – каков вид «окна сглаживания»);
- Б) какова ширина «окна сглаживания»;
- В) где расположены границы отрезка, на котором восстанавливается плотность распределения.

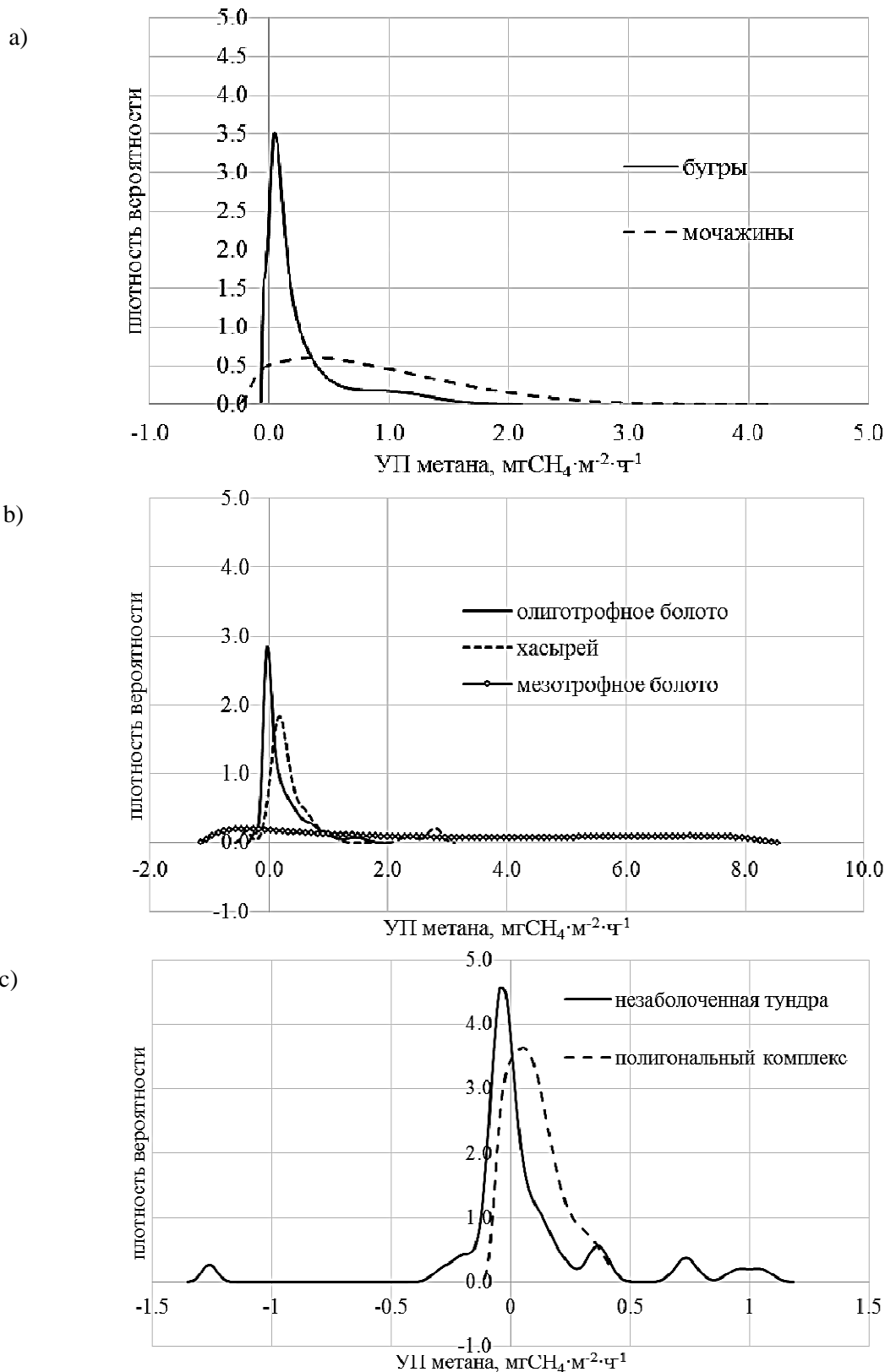


Рис.4. Распределения плотностей вероятности УП метана в соответствующих экосистемах / frequency distribution function of fluxes in the appropriate ecosystems.

Очевидно, что все это является источником неоднозначности при использовании функции ksdensity в том случае, если мы не можем четко обосновать выбор той или иной опции. По умолчанию ksdensity в качестве ядра использует нормальное распределение. Так стоит ли удивляться, что на выходе мы получаем распределения, подчас весьма похожие на нормальные? Если же задать другой выбор ядерной функции, то и результат окажется другим. Но какое ядро следует задавать при

восстановлении плотностей распределения вероятностей УП CH_4 для различных микроландшафтов тундры? Пока у нас нет ответа на этот вопрос. Впрочем, некоторый оптимизм внушает утверждение М.Б. Лагутина [2007, с. 392] о том, что при практическом оценивании плотности по заданной реализации выборки важен не столько вид окна, сколько правильное определение ширины «окна сглаживания». Но правильно ли определяется функцией `ksdensity` эта ширина? Проведенные нами расчеты показали, что при выбираемой по умолчанию ширине окна сглаживания будут подчас получаться различные результаты для разных ядерных функций. Наконец, рассмотрим последний источник неопределенности – границы отрезка, на котором восстанавливается плотность распределения.

Если пользователь не способен указать границы отрезка, следующие из каких-то теоретических предпосылок, то компьютерные программы могут использовать некоторое эмпирическое правило, например, формулы Стефанюка:

$$A = x_{\min} - v, \quad B = x_{\max} + v,$$

где

$$v = 5 \cdot (x_{\max} - x_{\min}) / (n - 1),$$

здесь x_{\max} , x_{\min} – соответственно, максимальное и минимальное значения элементов выборки; A , B – соответственно, координаты левой и правой границ интервала восстановления плотности вероятности, n – объем выборки [Вапник с соавт., 1984: с. 692].

Конкретное правило выбора *правой* границы в случае построения вероятностного распределения удельных потоков метана, по-видимому, не имеет особого значения. Если взять эту границу достаточно далеко (справа от x_{\max}), то, поскольку по физическому смыслу сверхбольшие удельные потоки маловероятны, кривая плотности распределения при больших значениях x в любом случае будет стремиться к оси абсцисс и, достигнув ее, будет сколь угодно долго идти далее вправо просто по этой оси.

А вот с левой границей ситуация совсем иная. Рассмотрим конкретный пример. Пусть выборка была не слишком велика, скажем, $n = 11$. При этом оказалось, что $x_{\max} = 10$, а $x_{\min} = -0.1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ (существенно меньшие величины потребления метана маловероятны по причине диффузионного ограничения: даже если бы живущие в почве метанотрофы были бы весьма активны и могли бы потребить, например, $1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, то этот 1 мг метана не мог бы за час достигнуть их из-за относительно низкого коэффициента диффузии²). По формуле Стефанюка для левой границы будем иметь: $A = -0.1 - 5 \cdot (10 + 0.1) / (11 - 1) = -5.15$. Но полученное значение $-5.15 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ превышает для почвенного поглощения метана все мыслимые пределы. Однако, с другой стороны, и точно указать эти пределы мы не можем. В данной работе, когда мы сталкивались с тем, что по умолчанию функция `ksdensity` выбирала физически бессмысленное значение A (т.е. меньше, чем несколько десятых $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$), мы задавали границу по следующему правилу:

$$A = \min_{i \in [1, n]} (x_i - \Delta x_i),$$

где x_i , Δx_i – выборочные значения удельных потоков и их погрешностей. Такую формулу для `ksdensity` можно «обосновать» следующим образом. Наименьшее наблюдавшееся нами в эксперименте значение поглощения CH_4 на данной разновидности почв – это x_{\min} . Кажется, что было бы разумным принять $A = x_{\min}$. Однако для `ksdensity` нельзя выбирать A таким образом, чтобы оно в точности совпадало с каким-либо выборочным значением: обязательно должно выполняться неравенство $A < x_{\min}$. Вполне естественным представляется уменьшить выборочное значение x_i на величину погрешности – ведь погрешность показывает неопределенность наших знаний, и истинное значение может оказаться каким угодно в пределах от $x_i - \Delta x_i$ до $x_i + \Delta x_i$.

Сказанное в этом разделе, конечно, не стоит воспринимать так, что мы уверены, будто бы неправильно восстановили вероятностные распределения удельных потоков. Мы применили стандартные средства широко распространенной компьютерной программы и использовали именно те параметры, которые выбираются ею по умолчанию. Так что в принципе, этим можно было бы

² А вот у метаногенов при образовании CH_4 такой проблемы не возникает. Если диффузия не успевает отводить метан, слишком бурно выделяющийся из клетки, то, очевидно, концентрация метана около нее повысится настолько, что заработает другой механизм переноса – конвективный. Действительно, если диффузия не справляется с отводом метана, то концентрация CH_4 превысит предел растворимости, в результате чего начнет образовываться газовая фаза, и газ, будучи легче воды, в конце концов удалится в виде пузырьков.

удовлетвориться. Однако сомнения остаются, и мы решили предупредить о них читателей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность к.ф.-м.н. Л.Л. Голубятникову (лаб. математической экологии Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН), любезно предоставившему возможность работы на хроматографе, а также А.П. Гармаш (МГУ имени М.В. Ломоносова), осуществившей отбор половины полевых образцов и хроматографический анализ части из них.

Особую благодарность авторы выражают В.С. Казанцеву (лаб. математической экологии ИФА им. А.М. Обухова РАН), любезно предоставившему возможность участия в организованной им экспедиции, и И.Е. Клепцовой (Томский государственный университет), определившей типы экосистем по снимкам Landsat.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1: Ядерный метод оценки плотности вероятности

Метод Парзена оценки плотности

Задача восстановления плотности распределения вероятности по выборке является центральной проблемой математической статистики. В данном приложении будет рассмотрен классический непараметрический способ решения этой задачи – метод Парзена [Вапник, 1979, с. 59, 323], называемый также ядерным методом [Косарев, 2008: с. 32] а в англоязычной литературе – kernel density estimator [Monahan, 2011, p. 345].

Для этого метода оценка ($p_{\text{я}}$) записывается в виде

$$p_{\text{я}}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K(x/h - x_i/h),$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – случайная выборка объемом n с плотностью вероятности $p(x)$, подлежащей оцениванию; $K(u)$ – ядро Парзена; h – его ширина [Косарев, 2008: с. 32]. Ядро должно удовлетворять следующим условиям: во-первых, $K(u) \geq 0$; во-вторых, $K(u) = K(-u)$; в-третьих³, $\int K(u) du = (h \cdot n)^{-1}$ и, наконец, в-четвертых, $K(u) \rightarrow 0$ при $|u| \rightarrow \infty$ [Айвазян и др., 1983, с. 335]. Отсюда видно, что форма ядра достаточно произвольна, например, это может быть гауссов профиль [Косарев, 2008: с. 32], который мы рассмотрим ниже при подробном обосновании метода.

Хотя для выбора того или иного ядра имеется пусть и весьма незначительный, но все же теоретический базис, однако существенным препятствием для его использования является вычислительная трудоемкость многих практических задач (когда n велико). Выбор ядра с *конечным носителем* может немного проигрывать в теоретическом и эстетическом плане, но значительно сокращает объем вычислений. Ядро с конечным носителем, имеющее некоторые теоретические преимущества – это ядро Епанечникова⁴ [Monahan, 2011, p. 346]:

$$K(u) = \begin{cases} (1 - u^2/5) \cdot 3 \cdot (4 \cdot 5^{1/2})^{-1} \cdot (h \cdot n)^{-1} & \text{если } |u| \leq 5^{1/2}, \\ 0 & \text{если } |u| > 5^{1/2}. \end{cases}$$

Ширина ядра и погрешность метода

В данном методе число h играет роль параметра регуляризации [Крянев и Лукин, 2003, с. 65]. Считается, что на гладкую теоретическую функцию плотности вероятности из-за случайности, связанной с ограниченным объемом выборки, накладывается шум [Костылев и др., 1991, с. 78]. При использовании функции $K(x)$ производится фильтрация «зашумленной» плотности вероятности. Для малых h полоса пропускания «фильтра» слишком широка, шум подавляется недостаточно эффективно. При больших h шум отфильтровывается, однако при этом возникают и искажения теоретической функции плотности вероятности. Оптимальным является такое значение h , при

³ В оригинальной работе [Айвазян и др., 1983, с. 335] интеграл в третьем условии равен 1, поскольку в отличие от [Косарев, 2008: с. 32], там вообще под ядром понимается не $K(u)$, а $K(u) \cdot h \cdot n$.

⁴ В оригинальной работе [Monahan, 2011, p. 346] в ядре Епанечникова отсутствует множитель $(h \cdot n)^{-1}$, поскольку в отличие от [Косарев, 2008: с. 32], там вообще под ядром понимается не $K(u)$, а $K(u) \cdot h \cdot n$.

котором достигается разумное сочетание сглаживания случайной и искажения полезной составляющих суммарной плотности вероятности.

Как выбирать константу h , если объем выборки ограничен? Ответа на этот вопрос нет [Вапник, 1979, с. 324]. Точнее говоря, конструктивные способы выбора подходящего значения при конечном объеме выборки могут быть предложены только на основании дополнительной информации об искомой плотности [Крянев и Лукин, 2003, с. 65].

Основываясь на рассмотрении нормального, лог-нормального, и t -распределения Silverman рекомендует после масштабирования⁵ ядра принять

$$h = 0.9 \cdot \min(\text{SD}, \text{IR}/1.34) \cdot n^{-1/5},$$

где SD – стандартное отклонение, а IR – межквартильный размах. Другой подход состоит в использовании перекрестной проверки достоверности, однако он может оказаться очень затратным с вычислительной точки зрения, поскольку требует более чем $O(n^2)$ операций [Monahan, 2011, р. 346].

При оптимальном выборе ширины h в зависимости от числа точек n погрешность метода Парзена

$$(\delta^2)_{\min}^{1/2} \sim n^{-2/5},$$

т.е. такая же, как и в методе полигона частот [Косарев, 2008: с. 32]. Здесь δ^2 – квадрат относительной⁶ погрешности плотности вероятности, а индекс «min» показывает, что речь идет не о любом возможном значении этой погрешности, а лишь о том, которое получено при наилучшем значении параметров метода.

Обоснование метода

Справедливо тождество [Вапник, 1979, с. 323]

$$p(x) = \int \delta(x-t) \cdot p(t) dt.$$

где $\delta(x)$ – функция Дирака.

Однако эта оценка плотности неприемлема, поскольку является обобщенной функцией. Модифицируем данную оценку, представив ее в виде классической функции за счет «размазывания» обобщенной функции Дирака [Крянев и Лукин, 2003, с. 64].

Рассмотрим последовательность функций, сходящуюся к $\delta(x)$: $\psi(x/h_1)/h_1, \dots, \psi(x/h_n)/h_n$;

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \psi(x/h_n)/h_n = \delta(x).$$

Такая последовательность существует. Например, она может быть следующей:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \exp(-0.5 \cdot x^2/h_n^2) / (2 \cdot \pi \cdot h_n^2)^{1/2} = \delta(x).$$

Для всякой непрерывной плотности $p(x)$ существует такая величина h , что замена в подинтегральном выражении $\delta(x)$ на функцию $\psi(x/h)/h$ мало повлияет на результат, т.е.

$$p(x) = \int \delta(x-t) \cdot p(t) dt \approx \int h^{-1} \cdot \psi(x/h-t/h) \cdot p(t) dt.$$

Заменим теперь математическое ожидание⁷ величиной среднего по выборке:

⁵ В.W. Silverman (1986), Density Estimation for Statistics and Data Analysis. London: Chapman & Hall. – Цит. по [Monahan, 2011, р. 346, 374]. Из Figure 12.2. в [Monahan, 2011, р. 347] представляется, что речь идет о таком масштабировании, при котором минимальное значение в выборке становится -1, а максимальное – +1.

⁶ Не путать относительную погрешность δ с дельта-функцией Дирака $\delta(x)$, которая используется при обосновании метода! О каждом слагаемом величины δ (в аналогичном случае расчета δ^2_{\min} для метода гистограмм) Косарев [2008: с. 31] совершенно явно говорит, что это та или иная *относительная* погрешность. Однако на поясняющем расчете рис. 9 он изображает, скорее, погрешность *абсолютную*. Тем не менее, нам представляется, что речь действительно идет именно об относительной погрешности – такой вывод можно сделать на основе анализа размерности расчетной формулы для погрешности аппроксимации.

⁷ Результат операции «осреднения» случайной величины $g(\xi)$, произведенной с учетом «взвешивания», отвечающего заданному распределению вероятностей случайной величины ξ , носит название математического ожидания $g(\xi)$ и обозначается $Eg(\xi)$. Итак, если ξ – непрерывная случайная величина с плотностью (совместной) вероятности $p(x)$, то

$$p(x) \approx \int h^{-1} \cdot \psi(x/h-t/h) \cdot p(t) dt \approx [h^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n \psi(x/h-x_i/h)]/n = p_{\text{я}}(x).$$

При достаточно большом объеме выборки это также мало повлияет на результат. Выражение в правой части и используется как формула для оценки плотности [Вапник, 1979, с. 323-324]. Очевидно, что введенное ранее ядро Парзена $K(u) = (h \cdot n)^{-1} \psi(u)$.

Но каким должен быть закон образования величины h , чтобы с ростом объема выборки оценка стремилась к истинной плотности вероятности? В 1962 г. Парзен, а в 1965 г. Надарая получили условия, обеспечивающие сходимость оценки Парзена к искомой равномерно непрерывной плотности. Оказывается, для сходимости по вероятности к искомой плотности в метрике C достаточно, чтобы $h_n \rightarrow 0$ и $n \cdot h_n^2 \rightarrow \infty$ при $n \rightarrow \infty$ (результат Парзена), а для сходимости с вероятностью единица достаточно, чтобы при любом $\mu > 0$ сходилась ряд

$$\sum_{i=1}^{\infty} \exp(-\mu \cdot i \cdot h_i^2)$$

(результат Надарая) [Вапник, 1979, с. 324].

$$\hat{E}g(\xi) = \int g(x) \cdot p(x) dx$$

(интегрирование производится по области всех возможных значений признака ξ). Эмпирическим (т.е. построенным по выборке x_1, x_2, \dots, x_n) аналогом математического ожидания функции $g(\xi)$ будет величина обычного «арифметического» среднего [Айвазян и др., 1983, с. 135-136]. Таким образом, сравнивая структуру интеграла $\int h^{-1} \cdot \psi(x/h) \cdot p(t) dt$ с $\hat{E}g(\xi)$, замечаем, что он представляет собой математическое ожидание случайной величины $h^{-1} \cdot \psi(x/h)$. Следовательно, эмпирическим аналогом математического ожидания в данном случае будет среднее арифметическое значение случайной величины $h^{-1} \cdot \psi(x/h)$, вычисленное по элементам выборки x_1, x_2, \dots, x_n .

ПРИЛОЖЕНИЕ 2: Результаты индивидуальных измерений

Таблица III. Удельные потоки метана из плоскобугристого комплекса и мезотрофного болота
 Table III. Methane fluxes from palsa complex and mesotrophic bog

Точка / Point	Координаты / Coordinates		Дата / Date	Температура, °C / Temperature of, °C			УБВ, см / Water table level, cm	M ^c , см	РП ^d	Удельный поток CH ₄ , мгCH ₄ ·м ⁻² ·ч ⁻¹ / CH ₄ flux, mgCH ₄ ·m ⁻² ·h ⁻¹		
	Широта / Latitude	Долгота / Longitude		воздуха / air	почвы на глубине h, см / soil at depths h, cm					Сред ^a	Погр ^b	
					0	5						10
<i>Плоскобугристый комплекс, мочажина</i>												
17-1	67.3833	78.6612	28.07.13	32.22	18.12	10.60	8.11	2	34	S; C	0.35	0.10
				29.49	18.62	10.26	8.11	2	34		0.21	0.23
				31.40	17.83	10.60	8.11	2	34		0.39	0.29
				32.22	18.12	10.60	8.11	4	37		1.65	1.80
				32.22	18.12	10.60	8.11	4	37		-0.01	0.07
				30.24	18.37	10.60	8.11	4	37		-0.03	0.09
17-3	67.3832	78.6616	28.07.13	24.36	19.57	15.61	12.60	2	40	S; E	0.25	0.58
				24.36	19.57	15.61	12.60				0.91	0.41
				24.36	19.57	15.61	12.60				0.56	0.55
<i>Плоскобугристый комплекс, мочажина близ небольшого озера</i>												
17-4	67.3831	78.6613	28.07.13	24.30	22.75	17.54	13.91	2	36	S; E; L	0.68	0.25
<i>Влажная полигональная мочажина в плоскобугристом комплексе</i>												
bog-day	67.3725	78.6195	02.08.13	10.84	14.15	12.10	11.64	8	42	S; C	0.79	0.35
				13.06	18.31	12.10	11.13				1.57	0.52
				16.64	23.96	12.60	11.13				0.92	0.14
				27.29	25.67	13.60	11.64				1.85	0.25
				26.00	23.53	13.74	11.64				1.25	0.09
				25.15	21.31	14.10	11.99				1.41	0.29
				17.64	18.38	13.60	12.14				0.59	0.51
				14.85	14.65	13.17	12.14				1.30	0.38
				16.64	23.96	12.60	11.13				0.92	0.14
<i>Плоскобугристый комплекс, мерзлые бугры</i>												
17-2	67.3833	78.6612	28.07.13	35.26	34.53	27.54	14.70	23	26	Clr; Cla; L	0.58	0.26
				34.67	34.46	29.77	16.96	23			-0.04	0.03
				34.81	34.31	28.91	16.39	15			1.00	0.51
				35.24	36.16	30.84	17.32	15			-0.03	0.02
bog-day	67.3725	78.6195	02.08.13	12.48	14.37	12.53	11.71	3	51	Cls; R; L	1.20	0.63
				13.06	18.31	12.10	11.13				1.16	0.74
				14.78	19.38	12.10	11.13				0.79	0.34
				16.64	23.96	12.60	11.13				0.58	0.26
				22.07	25.60	13.17	11.13				0.36	0.31
				27.29	25.67	13.60	11.64				0.35	0.16
				26.00	23.53	13.74	11.64				1.05	0.17
				25.15	21.31	14.10	11.99				0.22	0.16
<i>Переход плоскобугристого комплекса к мезотрофному болоту</i>												
10-1	67.3767	78.6452	30.07.13	24.18	18.12	15.03	10.07	31	32	C; S	0.04	0.02
10-4	67.3767	78.6452	30.07.13	23.33	22.41	18.95	13.36	33.5	43	S; C; E	0.14	0.05
				19.68	18.91	17.03	12.50				-0.02	0.01
<i>Мезотрофное болото близ озера</i>												
10-2	67.3766	78.6454	30.07.13	17.07	17.95	17.39	16.43	1	48	C; S; E	0.80	0.21
				11.48	19.02	18.40	16.65	1	48		1.02	0.09
				13.88	18.79	18.03	16.59	0	43		0.45	0.08
				13.88	18.79	18.03	16.59	1	48		1.56	0.59
				13.88	18.79	18.03	16.59	0	43		1.96	0.38
<i>Мезотрофное болото близ пересыхающего озера</i>												
10-3	67.3766	78.6456	30.07.13	19.62	16.76	14.13	12.10	2	47	S; C; E	0.19	0.03
				20.54	17.54	14.49	12.10				0.11	0.06
				17.37	15.68	13.85	12.10				0.30	0.10

Примечания.

a- среднее / average; b- погрешность / error; c- глубина мерзлого слоя / ice layer depth; d- описание растительного покрова, описание представлено следующими доминантными видами / plant cover description (dominant plants): S - *Sphagnum sp.*; C - *Carex sp.*; E - *Eriophorum sp.*; L - *Ledum decumbens*; Cls - *Cladonia sp.* Clr - *Cladonia rangiferina*; Cla - *Cladonia alpestris*; R - *Rubus chamaemorus*; Eq - *Equisetum fluviatile*; V - *Vaccinium uliginosum*; P - *Polytrichum commune*.

Таблица П2. Удельные потоки метана из олиготрофного, полигонального болота, древнего хасырея
Table П2. Methane fluxes from oligotrophic, polygonal bog, aged khasyreya

Точка / Point	Координаты / Coordinates		Дата / Date	Температура, °C / Temperature of, °C				УБВ, см / Water table level, cm	M, см	РП ^d	Удельный поток CH ₄ , мгCH ₄ ·м ⁻² ·ч ⁻¹ / CH ₄ flux, mgCH ₄ ·m ⁻² ·h ⁻¹		
	Широта / Latitude	Долгота / Longitude		воздуха / air	почвы на глубине h, см / soil at depths h, cm						Сред ^a	Позр ^b	
					0	5	10						
<i>Олиготрофное болото</i>													
14-2	67.3791	78.6450	29.07.13	26.75	22.75	17.08	–	26	31	C; S	0.51	0.06	
				25.76	23.11	18.30	–	32	42		0.31	0.06	
				24.04	22.47	18.58	–	26	31		0.69	0.52	
				24.04	22.47	18.58	–	32	42		0.12	0.08	
				22.25	21.21	18.33	–	32	42		0.66	0.59	
14-3	67.3791	78.6455	29.07.13	24.48	22.13	19.70	–	11	23	S; L; R	-0.01	0.01	
				24.73	22.38	19.62	–	9			0.16	0.13	
15-1	67.3708	78.6494	01.08.13	14.82	13.42	10.74	8.10	8	41	S; C	0.07	0.02	
				15.11	13.49	11.10	8.10				0.16	0.10	
15-2	67.3707	78.6496	01.08.13	13.73	13.69	11.53	6.56	11	22	Clr; L; R	-0.04	0.05	
				13.73	13.69	11.53	6.56				0.28	0.18	
				13.73	13.69	11.53	6.56				0.36	0.26	
				13.73	13.69	11.53	6.56				0.03	0.01	
<i>Полигональное болото, валик</i>													
16-1	67.3735	78.6485	31.07.13	17.54	16.42	13.11	7.82	–	40	Cla; Clr; L; R	-0.02	0.05	
				16.78	15.92	13.61	8.85				0.14	0.03	
<i>Полигональное болото, мочажина в центре полигона</i>													
16-4	67.3732	78.6466	31.07.13	15.48	14.87	17.20	16.94	-3	52.5	S; C	0.09	0.03	
				14.98	14.51	16.41	16.58				0.31	0.02	
				14.62	14.08	15.91	16.15				0.15	0.07	
<i>Древний хасырей, мочажина</i>													
14-1	67.3792	78.6454	29.07.13	32.07	27.54	18.62	12.38	0.5	37	E; S	0.38	0.30	
				32.90	28.55	18.83	12.63				37	0.33	0.11
				32.90	28.55	18.83	12.63				37	-0.38	0.85
				33.15	28.55	18.70	12.63				43	0.11	0.07
				32.90	28.55	18.83	12.63				43	0.09	0.14
14-4	67.3792	78.6454	29.07.13	28.26	25.27	20.43	14.62	2	46	E; S	0.17	0.12	
				29.05	26.10	20.76	14.99				46	2.82	0.38
				28.26	25.27	20.43	14.62				48	2.75	0.53
				30.48	26.18	21.37	15.19				48	2.34	0.29
				30.48	26.18	21.37	15.19				46	0.45	0.17
				30.48	26.18	21.37	15.19				48	0.63	0.30
				30.19	27.35	21.32	15.12				48	0.23	0.10

Примечания см. табл. П.1

Таблица П3. Удельные потоки метана из хасыреев (**Table П3.** Methane fluxes from khasyreys)

Точка / Point	Координаты / Coordinates		Дата / Date	Температура, °C / Temperature of, °C					УБВ, см / Water table level, cm	M, см	РП ^d	Удельный поток CH ₄ , мгCH ₄ ·м ⁻² ·ч ⁻¹ / CH ₄ flux, mgCH ₄ ·m ⁻² ·h ⁻¹		
	Широта / Latitude	Долгота / Longitude		Воздуха / air	почвы на глубине h, см / soil at depths h, cm							Сред ^a	Позр ^b	
					0	5	10	40(15) ^c						
khas	67.3771	78.6203	04.08.13	16.0	14.69	13.58	13.1	9.07	0	–	C	0.24	0.05	
				19.8	17.13	14.86	13.6	9.07				0.37	0.05	
				18.8	15.98	15.29	14.6	9.07				0.63	0.07	
				14.4	14.12	14.89	13.5	9.07				0.63	0.18	
				14.4	14.12	14.89	13.5	9.07				0.20	0.08	
				14.6	14.55	14.08	13.6	9.065				0.18	0.09	
				19.4	16.70	14.44	13.6	9.065				0.14	0.04	
				19.2	17.63	15.58	14.1	9.065				0.19	0.09	
				17.3	16.84	15.58	14.6	9.065				0.30	0.11	
				15.0	15.27	15.08	14.1	9.065				0.21	0.07	
11-1	67.3855	78.6069	05.08.13	17.8	15.04	14.06	13.4	(11.61)	-2	–	C; S; Eq	0.21	0.10	
				17.3	14.61	14.06	13.5	(11.61)				0.11	0.02	
				17.8	15.04	14.06	13.4	(11.61)				0.15	0.05	
				18.3	14.54	13.56	12.8	(11.61)				0.03	0.02	
11-3	67.3850	78.6089	05.08.13	11.5	11.60	11.78	11.3	–	-2.5	54	S; C	0.34	0.06	
				14.6	13.39	14.29	13.3	–				54	0.21	0.03
				13.0	12.96	13.00	12.3	–				60	0.09	0.02
				11.5	11.60	11.78	11.3	–				60	0.08	0.00

Примечания см. табл. П.1.

Таблица П4. Удельные потоки метана с ивового склона сухой тундры**Table П4.** Methane fluxes from osier slope of dry tundra

Характеристика участка измерений / Characteristics of the points of measurements	Температура, °С / Temperature of, °С				М ^с , см	Удельный поток CH ₄ , мгCH ₄ ·м ⁻² ·ч ⁻¹ / CH ₄ flux, mgCH ₄ ·m ⁻² ·h ⁻¹	
	Воздуха / air	почвы на глубине h, см / soil at depths h, cm				Сред ^а	Позр ^б
		0	5	10			
Т. 5-1. Дата отбора / Date 1.08.13 Координаты / Coordinates: 67.3754° N, 78.6174° E Доминантные виды растений / Dominant plants: <i>Sphagnum sp.</i> , <i>Vaccinium uliginosum</i> .	14.11	14.03	11.57	–	34	0.37	0.08
	13.89	13.92	12.94	9.25	34	-0.05	0.38
	13.39	13.34	12.39	8.96	34	-0.03	0.35
	12.32	12.34	11.69	8.60	34	0.73	1.16
	13.39	13.34	12.39	8.96	34	0.14	0.11
	13.89	13.92	12.94	9.25	41	-0.01	0.34
	13.39	13.34	12.39	8.96	41	0.13	1.17
	12.32	12.34	11.69	8.60	41	-1.26	1.54
	13.39	13.34	12.39	8.96	41	-0.04	0.06
Т. 5-2. Дата отбора / Date 1.08.13 Координаты / Coordinates: 67.3755° N, 78.6178° E Доминантные виды растений / Dominant plants: <i>Sphagnum sp.</i> , <i>Polytrichum commune</i> .	14.11	14.03	11.57	–	30	-0.05	0.17
	13.61	13.60	11.07	–	30	-0.05	0.23
	25.44	12.96	10.50	–	30	-0.04	0.09
	25.44	12.31	9.93	–	30	0.00	0.11
	25.44	13.60	11.07	–	30	-0.05	0.49
	25.44	14.03	11.57	–	35	-0.01	0.52
	25.44	13.60	11.07	–	35	-0.08	0.25
	25.44	12.96	10.50	–	35	-0.01	0.09
	25.44	12.31	9.93	–	35	0.95	1.05
25.44	13.60	11.07	–	35	0.05	0.23	

Примечания см. в П1.

Таблица П5. Суточные измерения УП метана из сухой тундры**Table П5.** Day measurement of methane fluxes from dry tundra

Характеристика участка измерений / Characteristics of the points of measurements	Время отбора (местное) / Local time	Температура, °С / Temperature of, °С			Микро-рельеф / Micro-elevation ^е	М ^с , см	Удельный поток CH ₄ , мгCH ₄ ·м ⁻² ·ч ⁻¹ / CH ₄ flux, mgCH ₄ ·m ⁻² ·h ⁻¹	
		воздуха / air	почвы на глубине h, см / soil at depths h, cm				Сред ^а	Позр ^б
			0	5				
Т. 3-1. Дата отбора / Date: 3.08.13 Координаты / Coordinates: 67.3734° N, 78.61967° E Доминантные виды растений / Dominant plants: <i>Cladonia rangiferina</i> , <i>Carex sp.</i> , <i>Ledum decumbens</i> .	1:30	13.63	12.61	8.82	повыш.	75	0.37	0.23
	1:33	13.63	12.61	8.82	пониж.	65	-0.05	0.47
	3:30	14.56	12.25	8.60	повыш.	75	0.74	0.32
	3:33	14.56	12.25	8.60	пониж.	65	0.18	0.26
	5:30	14.56	13.25	8.60	повыш.	75	-0.04	0.09
	5:33	14.56	13.25	8.60	пониж.	65	-0.07	0.36
	7:30	16.50	15.11	9.46	повыш.	75	0.05	0.22
	7:33	16.50	15.11	9.46	пониж.	65	-0.03	0.16
	9:30	19.29	17.55	9.82	повыш.	75	0.10	0.05
	9:34	19.29	17.55	9.82	пониж.	65	-0.05	0.35
	9:34	19.29	17.55	9.82	пониж.	65	0.05	0.03
	11:30	21.86	19.98	11.04	повыш.	75	-0.01	0.37
	11:34	21.86	19.98	11.04	пониж.	65	-0.05	0.14
	13:30	24.72	22.70	12.11	повыш.	75	-0.18	0.31
	13:34	24.72	22.70	12.11	пониж.	65	-0.28	0.27
	15:30	25.44	22.41	12.47	повыш.	75	1.05	0.70
	15:30	25.44	22.41	12.47	повыш.	75	-0.01	0.09
	15:33	25.44	22.41	12.47	пониж.	65	-0.20	0.35
	15:33	25.44	22.41	12.47	пониж.	65	0.07	0.22
	17:30	22.08	19.62	11.97	повыш.	75	0.12	0.21
	17:33	22.08	19.62	11.97	пониж.	65	-0.03	0.11
	17:33	22.08	19.62	11.97	пониж.	65	-0.03	0.02
	19:30	18.86	17.26	11.25	повыш.	75	0.23	0.47
	19:33	18.86	17.26	11.25	пониж.	65	0.00	0.47
	21:30	15.99	14.76	10.32	повыш.	75	-0.04	0.14
	21:33	15.99	14.76	10.32	пониж.	65	-0.07	0.16
23:30	13.27	12.10	9.11	повыш.	75	0.36	0.22	
23:33	13.27	12.10	9.11	пониж.	65	-0.04	0.17	

Примечания см. табл П1, е: повыш.- микроповышения / microelevations; пониж.- микропонижения / microdepressions.

ЛИТЕРАТУРА

- Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. 1983. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика. 471 с.
- Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. 1994. Вычислительные методы для инженеров. М.: Высшая школа. 544 с.
- Вапник В.Н. 1979. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. М.: Наука. 448 с.
- Вапник В.Н., Глазкова Т.Г., Кошечев В.А., Михальский А.И., Червоненкис А.Я. 1984. Алгоритмы и программы восстановления зависимостей. М.: Наука. 448 с.
- Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. 2005. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Известия РАН. Серия географическая. №5. С. 39-50.
- Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И. Физическая география СССР. Азиатская часть. 1970. М.: Мысль. 543 с.
- Глаголев М.В. 2008. Эмиссия метана: идеология и методология «стандартной модели» для Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. № S1. С. 176-190.
- Глаголев М.В. 2012. Высокий уровень стояния воды может снизить эмиссию метана из почвы // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т.3. №1(5). С. 1-10.
- Глаголев М.В., Клепцова И.Е. 2009. Эмиссия метана в лесотундре: к созданию «стандартной модели» (Aa2) для Западной Сибири // Вестник ТГПУ. Вып. 3(81). С. 77-81.
- Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.С., Филиппов И.В., Максютлов Ш.Ш. 2010. Эмиссия метана из болотных ландшафтов тундры Западной Сибири // Вестник ТГПУ. Вып. 3(93). С. 78-86.
- Глаголев М.В., Смагин А.В. 2006. Количественная оценка эмиссии метана болотами: от почвенного профиля – до региона (к 15-летию исследований в Томской области) // Доклады по экологическому почвоведению. Вып. 3. №3. С. 75-114. URL: http://jess.msu.ru/index.php?option=com_scibibliography&func=view&id=34&Itemid=121&catid=62 (дата обращения 08.10.2012).
- 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. URL: http://jess.msu.ru/index.php?option=com_scibibliography&func=view&id=55&Itemid=121&catid=65 (дата обращения: 15.11.2011).
- Глаголев М.В., Шнырев Н.А. 2008. Летне-осенняя эмиссия CH₄ естественными болотами Томской области и возможности ее пространственно-временной экстраполяции // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. №2. С. 24-36.
- Голубятников Л.Л., Казанцев В.С. 2013. Вклад тундровых озер Западной Сибири в метановый бюджет атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 49. № 4. С. 430-438.
- Калиткин Н.Н. 1978. Численные методы. М.: Наука. 512 с.
- Кароль И.Л., Киселев А.А. 2004. Атмосферный метан и глобальный климат // Природа. № 7. С. 47-52.
- Косарев Е.Л. 2008. Методы обработки экспериментальных данных. М.: ФИЗМАТЛИТ. 208 с.
- Костылев А.А., Миляев П.В., Дорский Ю.Д., Левченко В.К., Чикулаева Г.А. 1991. Статистическая обработка результатов экспериментов на микро-ЭВМ и программируемых калькуляторах. Л.: Энергоатомиздат. ЛО. 304 с.
- Крянев А.В., Лукин Г.В. 2003. Математические методы обработки неопределенных данных. М. ФИЗМАТЛИТ. 216 с.
- Кутилин В.С., Денисов В.И., Федоров Ю.Т. 2004. Справочное пособие по курсу «Физическая география материков и океанов» (общие сведения о материках, частях света и океанах). Ростов-на-Дону: изд. РГУ. 53 с.
- Лагутин М.Б. 2007. Наглядная математическая статистика. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 472 с.
- Лапко А.В., Лапко В.А., Соколов М.И., Ченцов С.В. 2000. Непараметрические системы классификации. Новосибирск: Наука. 240 с.
- Мацевитый Ю.М., Лушпенко С.Ф. 1990. Идентификация теплофизических свойства твердых тел. Киев: Наук. думка. 216 с.
- Минько О.И. 1988. Планетарная газовая функция почвенного покрова // Почвоведение. № 7. С. 59-75.
- Паников Н.С., Титлянова А.А., Палеева М.В., Семенов А.М., Миронычева-Токарева Н.П., Макаров В.И., Дубинин Е.В., Ефремов С.П. 1993. Эмиссия метана из болот юга Западной Сибири // Доклады АН СССР. Т. 330. №3. С. 388-390.
- Природные условия и естественные ресурсы СССР. Западная Сибирь. 1963 / Г.Д. Рихтер (ред.). М.: изд-во Академии наук СССР. 488 с.
- Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Башкин В.Н., Барсуков П.А., Максютлов Ш.Ш. 2011. Вклад мерзлотных бугров в эмиссию метана из болот тундры Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 2. № 2(4). EDCCrgr0002.
- Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Максютлов Ш.Ш. 2011. Эмиссия метана из болот тундры: Результаты наблюдений 2010 г. // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 2. № 1(3). EDCCrgr0001. Статья также доступна по адресу: http://www.ugrasu.ru/uploads/files/EDCC_2_1_Sabrekov.pdf (дата обращения: 16.11.13).
- Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. 1979. Методы решения некорректных задач. М.: Наука.
- Усова Л.И. 2009. Практическое пособие по ландшафтному дешифрированию аэрофотоснимков различных типов болот Западной Сибири. СПб.: Нестор-История. 80 с.
- Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центр данных» [Электронный ресурс]: Температура воздуха и количество осадков (ежедневные данные). URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation> (дата обращения 24.11.13).
- Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. 2004. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена. 342 с.
- Adamsen A.P.S., King G.M. 1993. Methane Consumption in Temperate and Subarctic Forest Soils: Rates, Vertical Zonation, and Responses to Water and Nitrogen // Applied and Environmental Microbiology. V. 59. No. 2. P. 485-490.
- Augustin J., Merbach W., Schmidt W., Reining E. 1996. Effect of changing temperature and water table on trace gas

emission from minerotrophic mires // Journal of Applied Botany-Angewandte Botanik. V. 70. P. 45-51.

Cao M., Marshall S., Gregson K. 1996. Global carbon exchange and methane emissions from natural wetlands: Application of a process-based model // Journal of Geophysical Research. V. 101. P. 14399-14414.

Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Quéré C. Le, Myneni R.B., Piao S. and Thornton P. 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 570 pp.

Kettunen A., Kaitala V., Alm J., Silvola J., Nykanen H., Martikainen P.J. 1996. Cross-correlation analysis of the dynamics of methane emissions from a boreal peatland // Global Biogeochemical Cycles. V.10. No. 3. Pp. 457-471.

Khalil M.A.K., Shearer M.J. 2000. Sources of methane: an overview // Atmospheric Methane: Its Role in the Global Environment. New-York: Springer-Verlag. P. 98-111.

King S.L., Quay P.D., Lansdown J.M. 1989. The $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ kinetic isotope effect for soil oxidation of methane at ambient atmospheric concentrations // Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012). V. 94. №. D15. P. 18273-18277.

Lapshina E.D., Filippov I.V., Bleuten W. 2007. Classification of mire landscapes for estimation of carbon cycling of peatlands of Northern West Siberia // West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present. P. 16.

Monahan J.F. 2011. Numerical Methods of Statistics. Cambridge etc.: Cambridge University Press.

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 / Inoue G. (ed.). Tsukuba: Isebu. P. 37-39.

Repo M.E., Huttunen J.T., Naumov A.V., Chichulin A.V., Lapshina E.D., Bleuten W., Martikainen P.J. 2007. Release of CO_2 and CH_4 from small wetland lakes in western Siberia // Tellus. V. 59B. P. 788-796.

Rodhe H. 1990. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect // Science. V. 248. №. 4960. P. 1217-1219.

Stepanenko V.M., Machul'skaya E.E., Glagolev M.V., Lykossov V.N. 2011. Numerical Modeling of Methane Emissions from Lakes in the Permafrost Zone // Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics. Vol. 47. No. 2. P. 252-264.

Whalen S.C., Reeburgh W.S. 1990. Consumption of atmospheric methane by tundra soils // Nature. V. 346. Pp. 160-162.

Whalen S.C., Reeburgh W.S., Sandbeck K.A. 1990. Rapid methane oxidation in a landfill cover soil // Applied and environmental microbiology. V. 56. №. 11. P. 3405-3411.

METHANE FLUXES FROM SOUTH TUNDRA ECOSYSTEMS OF WEST SIBERIA

Krivenok L.A., Glagolev M.V., Fastovets I.A., Smolentsev B.A., Maksyutov S.S.

Methane is one of the trace gasses, and its impact on the global warming is estimated to be approximately 15 per cent. Even though its concentration in the atmosphere increases relatively slowly, methane absorbs infrared radiation many times more intensively than carbon dioxide does. This makes it of great significance since anthropogenic sources of methane increased in the past decades as well as natural methane emission due to temperature rising.

Wetlands are believed to be the main natural source of methane. This is why West Siberia was chosen to study methane fluxes as its territory up to 27 per cent consists of wetlands. A large-scale survey was taken with the aim of measuring methane fluxes in different ecosystems, estimating the total (regional) methane flux from West Siberia and studying the correlation between methane emission and different factors influencing it. Since 1990th almost all the territory of West Siberia was covered with measurements, but tundra still needs to be studied. The interest in studying methane fluxes from tundra is supported by the fact that here temperature increases faster than, e.g. in south taiga. These rapid changes of temperature may affect methane emission in the future in a rather strong way.

In 2013 season, from July 18 to August 5, measurements of methane emissions in south tundra subzone of West Siberia were carried out, using a static chamber technique. Sampling was conducted in Tazovskiy region, Yamal-Nenets Autonomous Okrug, 12 km SSW from the town of Tazovskiy in the most common for this region mire ecosystems: khasyreys, polygonal, oligotrophic and mesotrophic bogs, palsa complexes and dry tundra. The highest methane fluxes values were determined at mesotrophic bogs (total sample median was $2.75 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, lower and upper quartiles were 0.12 and $4.78 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, respectively) and hollows of palsa complex (median $0.79 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, lower and upper quartiles 0.37 and $1.28 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, respectively). The lowest flux values were found at mineral soils of dry tundra, where the median, lower and upper quartiles were -0.05 , -0.01 and $0.11 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, respectively. Also, we report that no daily dynamics of fluxes in dry tundra was found. The frequency distribution functions of fluxes, which was made for oligotrophic bogs, palsa and khasyreys, are similar to lognormal ones. For mesotrophic bogs high fluxes are more frequent than for other ecosystems, where the frequency is near zero. Also, despite the fact that for mesotrophic bogs the most frequent flux is negative, flux median was $2.75 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ which in owing to high fluxes presence with not zero frequency.

Key words: methane emission, mire ecosystems, wet tundra, dry tundra

Поступила в редакцию 11.03.2014

Переработанный вариант: 13.06.2014