

УДК 502.057

## ЭМИССИЯ МЕТАНА ИЗ ОЗЕР СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2023 г. В. С. Казанцев<sup>a, \*</sup>, Л. А. Кривенко<sup>a</sup>, Ю. А. Дворников<sup>a, b</sup>, В. А. Ломов<sup>a</sup>, А. Ф. Сабреков<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup>Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Пыжевский пер., д. 3, стр. 1, Москва, 119017 Россия

<sup>b</sup>Департамент ландшафтного проектирования и устойчивых экосистем  
Аграрно-технологического института РУДН, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, 117198 Россия

<sup>c</sup>Югорский государственный университет, ул. Чехова, д. 16, Ханты-Мансийск, 628012 Россия

\*e-mail: kazantsev@ifaran.ru

Поступила в редакцию 23.12.2022 г.

После доработки 16.02.2023 г.

Принята к публикации 10.03.2023 г.

В работе приведены результаты измерений удельных потоков (УП) метана в атмосферу из термокарстовых озер, расположенных на территории Российской Федерации в предгорьях Полярного Урала, на побережье Карского моря и в северо-западной части полуострова Ямал. Всего исследовано 13 водных объектов и измерено около 500 УП метана методом плавающих камер. Результаты показали, что 95% УП не превышает  $8 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ . Для этих УП выявлена статистически значимая корреляция с приземной скоростью ветра во время измерения, которая во многом определяет интенсивность газообмена на границе “вода – атмосфера”. Исключениями из этой зависимости стали измерения в предполагаемой зоне выхода метановых сипов. Для большинства озер наибольший разброс измеренных УП наблюдался в мелководной части. Проанализирована суточная динамика УП метана, которая аппроксимирована синусоидальной функцией. Для представленных в работе озер диапазон оценок эмиссии метана составляет  $0.23\text{--}775.38 \text{ г CH}_4 \text{ ч}^{-1}$ . Результаты, полученные в ходе работы, – важный материал для расчетов региональных оценок эмиссии метана с поверхности термокарстовых озер тундровой зоны.

**Ключевые слова:** парниковые газы, пресноводные экосистемы, удельные потоки, суточная динамика, углеродный баланс

DOI: 10.31857/S0002351523030057, EDN: TNPJKD

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Метан – один из ключевых парниковых газов в атмосфере, который имеет очень высокий потенциал глобального потепления по отношению к углекислому газу. Его источники могут быть природного и антропогенного характера. К существенным природным источникам метана в атмосфере относятся водоемы суши, о которых и пойдет речь в данной статье. Помимо этого, интерес представляют также потенциальные эмиссии метана из внутримерзлотных резервуаров вследствие развития подозерных таликов.

Основной источник метана в озерной экосистеме – анаэробное разложение органического вещества (как автохтонного, так и аллохтонного) в донных отложениях водоема. При этом метан, интенсивность генерации которого зависит от развития микроорганизмов архей-метаногенов [Bazhin, 2003; Grusa–Rokosz and Tomaszek, 2015], может выходить из донных осадков в виде двух основных механизмов переноса: диффузионного и пузырькового.

Диффузионный поток имеет достаточно низкую скорость, а также метан, переносимый этим путем, подвержен окислению в вышележащих слоях озера, где содержание растворенного кислорода велико. В результате деятельности метанотрофных микроорганизмов до 90% метана может быть окислено в водной толще [Guerin and Abril, 2007]. По этой причине диффузионный удельный поток часто имеет небольшие значения.

Пузырьки метана возникают при перенасыщении порового раствора донных отложений и поднимаются к поверхности воды [Miller et al., 2007; Ostrovsky et al., 2008]. Метан, переносимый в виде пузырьков, менее подвержен окислению. Однако пузырьки могут растворяться в воде, после чего метан из них может окисляться. Кроме того, пузырьковый перенос метана не может наблюдаться на больших глубинах, так как важный фактор образования пузырьков – это гидростатическое давление. Так, например, при резком падении уровня воды в водоеме пузырьковый перенос метана может значительно интенсифицироваться [Harrison et al., 2017].

К менее значительным составляющим потока метана в атмосферу из озерной экосистемы также относят поток, обусловленный макрофитами [Milberg et al., 2017]. В частности, он возникает при обильном развитии крупной водной растительности, из-за чего у берегов озер образуется большое количество органического вещества, при разложении которого также выделяется метан. Однако в данной работе основное внимание будет уделяться именно потоку метана на границе “вода-атмосфера”.

Актуальность приведенного в данной статье исследования обусловлена также и тем, что в последнем докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата приведены новые значения оценок общей эмиссии метана с озер мира [IPCC, 2021]. Согласно таблице на с. 703 этого доклада, на пресноводные водоемы приходится 159 Тг  $\text{CH}_4$  в год, что составляет 22% от всех источников метана в атмосфере – как природных, так и антропогенных. Тундровые озера имеют значительную суммарную площадь, поэтому для более точных оценок эмиссий из озер данной зоны полученные нами результаты имеют достаточно высокое значение в региональном и глобальном масштабе. Северные территории России труднодоступны, на данный момент проведено относительно небольшое количество полевых наблюдений эмиссии метана из располагающихся там озер (см, например, [Глаголев и др., 2010а; Kazantsev et al., 2018; Sabrekov et al., 2011; Savvichev et al., 2021]). Получение достаточно больших объемов данных по эмиссиям метана в совокупности с сопутствующими факторами окружающей среды позволит увеличить точность экстраполяции этих эмиссий на больший временной и пространственный масштаб.

Целью данной работы являлось получение оценок эмиссий парникового газа метана из выбранных тундровых озер Западной Сибири, установление общих закономерностей распределения удельных потоков (УП) метана из данных экосистем и выявление влияния на интенсивность эмиссии различных факторов окружающей среды.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести прямые измерения значений УП метана из озер камерным методом, включая изучение суточной динамики эмиссии, одновременно с количественной фиксацией параметров окружающей среды.
2. На основе полученных данных дать оценку потока метана с поверхности изучаемых озер.
3. Методами статистического анализа определить факторы окружающей среды коррелирующие с интенсивностью эмиссии метана.
4. Количественно описать суточную динамику эмиссии метана.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### 2.1. Полевые и лабораторные работы

Полевые исследования проводились на трех ключевых участках: в предгорьях Полярного Урала и на побережье Карского моря в августе 2018 г. и в районе стационара “Васькины Дачи” на Центральном Ямале в августе 2019 г. (рис. 1).

Первая группа озер (ключевой участок “Побережье Карского моря”) – Первое, Долинное, Хасырейное, Питьевое – расположены в биоклиматической подзоне D (северная полоса типичных тундр) [CAVM Team, 2003], которая характеризуется средней температурой июля  $9^\circ\text{C}$ . Вторая группа озер, расположенная в восточных предгорьях Уральских гор (ключевой участок “Полярный Урал”) – Панда, Подсклонное, Ухо-Правое – относится к биоклиматической подзоне E (южные гипоарктические тундры) [Юрцев и др., 1978; CAVM Team, 2003]. Эта подзона характеризуется средней температурой июля около  $12^\circ\text{C}$ . Зональным типом растительности являются низкокустарниковые ерниково-ивняковые осоково-лишайниково-моховые бугорковатые и пятнистобугорковатые тундры, развитые на междуречьях. Донные отложения озер богаты органическим веществом. Данные озера являются результатом протекания термокарстовых процессов на территории обозначенных природных зон. Характеристики исследуемых объектов отражены в табл. 1.

На ключевом участке “Васькины Дачи” было детально изучено шесть озер: LK-002, LK-008, LK-010, LK-012, LK-018, LK-019 [Dvornikov et al., 2016]. В табл. 2 собраны морфометрические характеристики этих водных объектов. Согласно циркумполярной арктической карте растительности, территория стационара относится к биоклиматической подзоне D (северные гипоарктические тундры) [CAVM Team, 2003], которая характеризуется средней температурой июля равной  $9^\circ\text{C}$ . Из кустарников широко распространены ивы сизая и мохнатая (*Salix glauca* u. *S. lanata*), а также карликовая березка (*Betula nana*) [Ребристая и Хитун, 1998]. Растительные сообщества с сомкнутым кустарниковым ярусом приурочены главным образом к днищам долин и склонам водоразделов. Водосборные бассейны озер характеризуются различными фациальными условиями. Литологический состав верхней толщи V (Салехардской), IV (Казанцевской) и III морских равнин – пески и глины, встречаются главным образом в зоне осушки озер [Dvornikov et al., 2017]. В водосборах озер LK-018 и LK-019 в 2013 году образовались термоцирки. Появившиеся обнажения включают погребенные повторно-жильные льды, вклинивающиеся в пластовые льды. В обнажениях также вскрываются погребенные залежи торфа мощностью в несколько метров и минеральные породы, насыщенные органическим веществом.

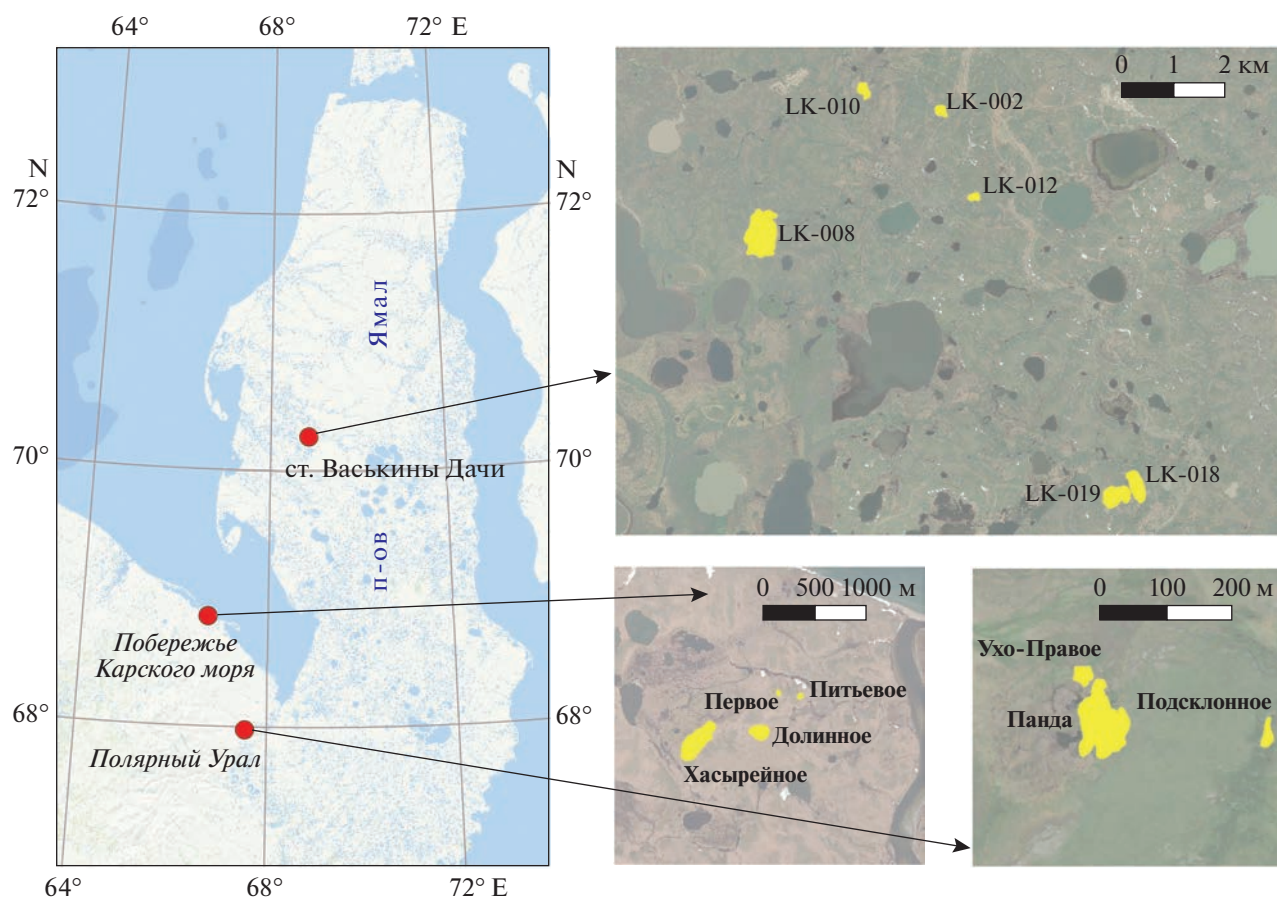


Рис. 1. Карта расположения участков исследования. Картографическая подложка [ESRI et al., 2020].

Полевые измерения УП метана проводились методом темных плавающих камер с экспозицией 30 минут. Использовались пластиковые камеры, покрытые снаружи светоотражающей пленкой для отражения солнечных лучей, объем камер –  $0.009 \text{ м}^3$ , площадь основания –  $0.076\text{--}0.080 \text{ м}^2$ . На каждом из озер точки измерения располагались по трансекте от условной середины озера (самой

глубокой части) к берегу, измерения на каждой точке осуществлялись в 8–18 повторностях (на одной из точек, расположенной вблизи метанового сипа на озере LK-008, было сделано 5 повторностей). Для изучения суточной динамики эмиссии метана на озере LK-002 в центральной части измерения проводились каждые два часа в течение суток в одной точке в двухкратной пов-

Таблица 1. Список исследованных озер на побережье Карского моря и Полярном Урале

ID	Площадь, га	Широта	Долгота	Средняя глубина, м	Максимальная глубина, м
Побережье Карского моря					
Первое	0.11	68.86153	66.70786	2	3.1
Долинное	1.92	68.86017	66.67236	1.8	2.4
Хасырейное	6.10	68.85681	66.68729	1.5	1.7
Питьевое	0.20	68.86177	66.71228	н.д.*	н.д.
Полярный Урал					
Подсклонное	0.04	67.95109	67.54961	1.1	2
Ухо-правое	0.06	67.95187	67.54285	н.д.	1.6
Панда	0.56	67.95123	67.54347	2.4	3.4

\*н.д. – нет данных.

**Таблица 2.** Список исследованных озер на стационаре “Васькины Дачи”

ID	Площадь, га	Широта	Долгота	Средняя глубина, м	Максимальная глубина, м	Отметка уреза воды, м (БС-1977)*
LK-002	3.23	68.9045	70.2977	1.1	2.3	33.9
LK-008	41.88	68.811	70.276	5.5	20.7	11.7
LK-010	4.25	68.8642	70.3012	0.6	1.8	4.5
LK-012	2.22	68.9216	70.2825	3.2	7.3	20.5
LK-018	12.85	69.0061	70.2319	2.3	7.8	6.3
LK-019	15.16	68.9951	70.2301	1.9	6.3	6.3

\* БС-1977 – Балтийская система высот.

торности. Для препятствия попадания пузырьков метана в камеру при суточных измерениях экспериментально были использованы пластиковые щиты, закрепленные на тонких веревках с нижней стороны камеры на удалении 70 см от нее. В течение каждого измерения отбирались образцы камерного воздуха и воды с поверхности для определения концентрации растворенного в воде метана.

Параллельно фиксировалась температура поверхности воды и дна (температурные датчики Thermochron DS 1922L), электропроводность и кислотность озерной воды (портативный мультиметр Hanna HI98129 Combo) и метеорологические характеристики: температура воздуха, давление и скорость ветра (портативная метеостанция Skywatch GEOSN11). Отбор проб газа и расчеты УП метана проводились по методологии, описанной в [Bastviken et al., 2010; Глаголев и др., 2010b], пробы анализировались на газовом хроматографе “Кристалл 5000.2” (ЗАО СКБ “Хроматэк”, г. Йошкар-Ола) с пламенно-ионизационным детектором (ПИД). Каждый образец хроматографировался в трехкратной повторности. Объем пробоотборника (петли) – 0.250 мл, длина хроматографической колонки – 3 м, диаметр – 2 мм, абсорбент Hayesep-N 80/100. Температура колонки – 60°C, температура ПИД – 150°C. В качестве газа-носителя использовался азот чистотой 99.999% с расходом 30 мл мин<sup>-1</sup>. Расход водорода на горелке – 20 мл мин<sup>-1</sup>, воздуха – 200 мл мин<sup>-1</sup>. Калибровка хроматографа осуществлялась с помощью поверочных газовых смесей производства ООО “Мониторинг”, г. Санкт-Петербург со следующими концентрациями метана: 0.49 ± 0.07, 5.58 ± 0.5, 9.92 ± 0.6, 100 ± 5, 1000 ± 30 млн<sup>-1</sup>.

## 2.2. Определение минимально возможного УП метана из атмосферы в озеро

В результате расчетов УП по полученным полевым данным было получено 12 отрицательных значений УП в диапазоне от –4.98 до –0.002 мг СН<sub>4</sub> м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup> (в данной работе УП, соот-

ветствующие эмиссии метана с поверхности озера в атмосферу, мы приводим с положительным знаком, а УП с отрицательным знаком соответствуют поглощению метана из атмосферы). В связи с этим необходимо выяснить, являются ли данные УП артефактными и их нужно отбросить, или же они отражают реально идущие в экосистеме процессы.

Наименьший по величине возможный УП метана из атмосферы в воду был рассчитан с использованием так называемой двухслойной модели [Liss and Slater, 1974; Repo et al., 2007; Klaus and Vachon, 2020], согласно которой поток газа между поверхностью между атмосферой и водным объектом  $F$  (мг СН<sub>4</sub> м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup>) прямо пропорционален разнице между фактической концентрацией растворенного в воде газа  $C_{dis}$  и равновесной концентрацией газа в воде, соответствующей его атмосферной концентрации,  $C_{eq}$  (обе – мг СН<sub>4</sub> м<sup>-3</sup>):

$$F = k(C_{dis} - C_{eq}), \quad (1)$$

где  $k$  (м ч<sup>-1</sup>) – коэффициент обмена между водой и атмосферой, всегда положительный по физическому смыслу. Минимально возможным потоком из атмосферы в воду при отсутствии информации о  $C_{dis}$  можно принять тот, который наблюдается при мгновенном потреблении метана в воде микроорганизмами, то есть при  $C_{dis}$  равном 0. Таким образом, наименьший возможный удельный поток  $F_{min}$  (мг СН<sub>4</sub> м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup>) будет ограничен только физическим процессом растворения атмосферного метана в воде и равен

$$F_{min} = -kC_{eq}. \quad (2)$$

Коэффициент обмена между водой и атмосферой согласно [Jähne et al., 1987; Striegl et al., 2012] определяется как:

$$k = k_{600} \left( \frac{Sc_{600}}{600} \right)^x, \quad (3)$$

где  $k_{600}$  – эмпирический параметр (м ч<sup>-1</sup>), являющийся функцией свойств атмосферной турбулентности над водным объектом и его собствен-

ных характеристик, таких как площадь, форма и т.д. [Klaus and Vachon, 2020],  $Sc_{600}$  – число Шмидта для данного газа при данной температуре (безразмерное),  $x$  – безразмерный эмпирический параметр, характеризующий затухание турбулентности на поверхности водного объекта, варьирующий от  $-1$  до  $-0.5$  [Jähne et al., 1987; Striegl et al., 2012]. Измеренные значения  $k_{600}$  почти никогда не превышают  $0.4 \text{ м ч}^{-1}$  [Klaus and Vachon, 2020]. Для указанной выше минимальной температуры воды число Шмидта, рассчитанное по эмпирической формуле для метана из [Rero et al., 2007], равно 1127.  $k$  принимает максимальные значения в рамках диапазона возможных значений  $x$  при  $x$ , равном  $-0.5$ . Тогда максимально возможное значение  $k$  равно  $0.29 \text{ м ч}^{-1}$ .

$C_{eq}$  для метана можно рассчитать на основе закона Генри исходя из его концентрации в атмосфере, минимальной температуры пресной воды во время измерения для исследованных объектов, равной  $8.7^\circ\text{C}$  (берем именно минимальную температуру, так как чем она ниже, тем больше газа может раствориться в воде), а также характеристик растворимости, собранных в [Sander, 2015]. Учитывая, что медиана  $\pm$  половина межквартильного размаха измеренных концентраций метана в приземном слое воздуха на высоте 80 см над поверхностью воды для всех точек исследования составила  $2.12 \pm 0.12 \text{ млн}^{-1}$ , равновесная концентрация метана  $C_{eq}$  будет равна  $0.066 \pm 0.004 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-3}$ . Тогда наименьшее возможное потребление метана поверхностью водоема  $F_{\min}$  для этих участков составит  $-0.019 \pm 0.001 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ .

Сопоставим это значение с реальными скоростями потребления метана метанотрофами в верхних, богатых кислородом слоях бореальных озер. При близких к атмосферным концентрациям метана потребление метана идет по реакции первого порядка, в этих слоях составляя  $-0.004$ – $(-0.016) \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$  [Striegl and Michmerhuizen, 1998; Utsumi et al., 1998; Bastviken et al., 2008]. Тогда при  $C_{eq}$ , равной  $0.066 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-3}$ , богатые кислородом слои воды (верхние 5 метров пресноводных водоемов) могут потребить около  $-0.001$ – $(-0.005) \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ . Это означает, что потребление атмосферного метана водными объектами вероятнее всего ограничено характеристиками микробных сообществ, а вычисленное выше значение  $F_{\min}$  является действительно минимальным УП на границе атмосферы с водным объектом, значения  $F$  ниже которого лишены физического смысла.

### 2.3. Математическое представление данных

Во время каждой серии камерных измерений УП метана определялись и концентрации метана

в воде, что позволило с помощью метода thin boundary layer (TBL) [UNESCO/ИНА, 2010] оценить диффузионную составляющую потока метана. Данный метод дает оценку интенсивности газообмена на границе “вода-атмосфера” по разнице концентраций газа в воде и в воздухе.

В ходе работы был проведен анализ по поиску регрессионных зависимостей между величиной УП в атмосфере и факторами окружающей среды. Для оценки качества полученных регрессий были использованы коэффициент корреляции Пирсона ( $R$ ),  $F$ -критерий значимости регрессий, у которого было определено  $p$ -value с уровнем надежности 95%. Также был использован коэффициент несовпадения Тейла ( $U$ ), который варьирует от 0 при полном совпадении экспериментальных и смоделированных данных до 1 при очень плохом совпадении [Theil, 1958].

Основываясь на зависимости, полученной нами ранее для термокарстового озера в тундре Западной Сибири [Kazantsev et al., 2018], мы аппроксимировали суточную динамику УП для озера LK-002 функцией вида (4):

$$F = b_1 + b_2 T_{\text{air}} \sin(2\pi^*(b_3 - h)/24), \quad (4)$$

где  $F$  – УП метана ( $\text{мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ ),  $b_1, b_2, b_3$  – подобранные методом наименьших квадратов коэффициенты с их стандартной ошибкой,  $T_{\text{air}}$  – температура воздуха на высоте 0.1 м ( $^\circ\text{C}$ ),  $h$  – время середины измерения, представленное в виде десятичной дроби, где целая часть соответствует часам.

Для каждого из озер была сделана оценка эмиссии метана в дневное время (т. к. большинство измерений шло в светлое время суток). Для этого каждый УП был разложен на диффузионную и пузырьковую компоненту следующим образом. Каждому из измеренных камерным методом УП метана  $F_{ch}$  поставлен в соответствие УП метана  $F_{TBL}$ , оцененный методом TBL. В случае, если  $F_{TBL} \geq F_{ch}$ , диффузионная компонента приравнивается к  $F_{ch}$ , пузырьковая компонента – к нулю. Если же  $F_{TBL} < F_{ch}$ , диффузионная компонента равна  $F_{TBL}$ , а пузырьковая вычислялась как  $(F_{ch} - F_{TBL})$ . Затем для каждого озера суммировалась медиана диффузионной компоненты и среднее значение пузырьковой, полученная величина умножалась на площадь озера.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 3.1. Статистические характеристики удельных потоков метана на различных озерах и их связь с внешними факторами

В ходе работ на трех описанных участках было измерено 523 УП метана с разных озер и разных точек измерений, из них 10 отрицательных УП отфильтровано по принципу, описанному в раз-

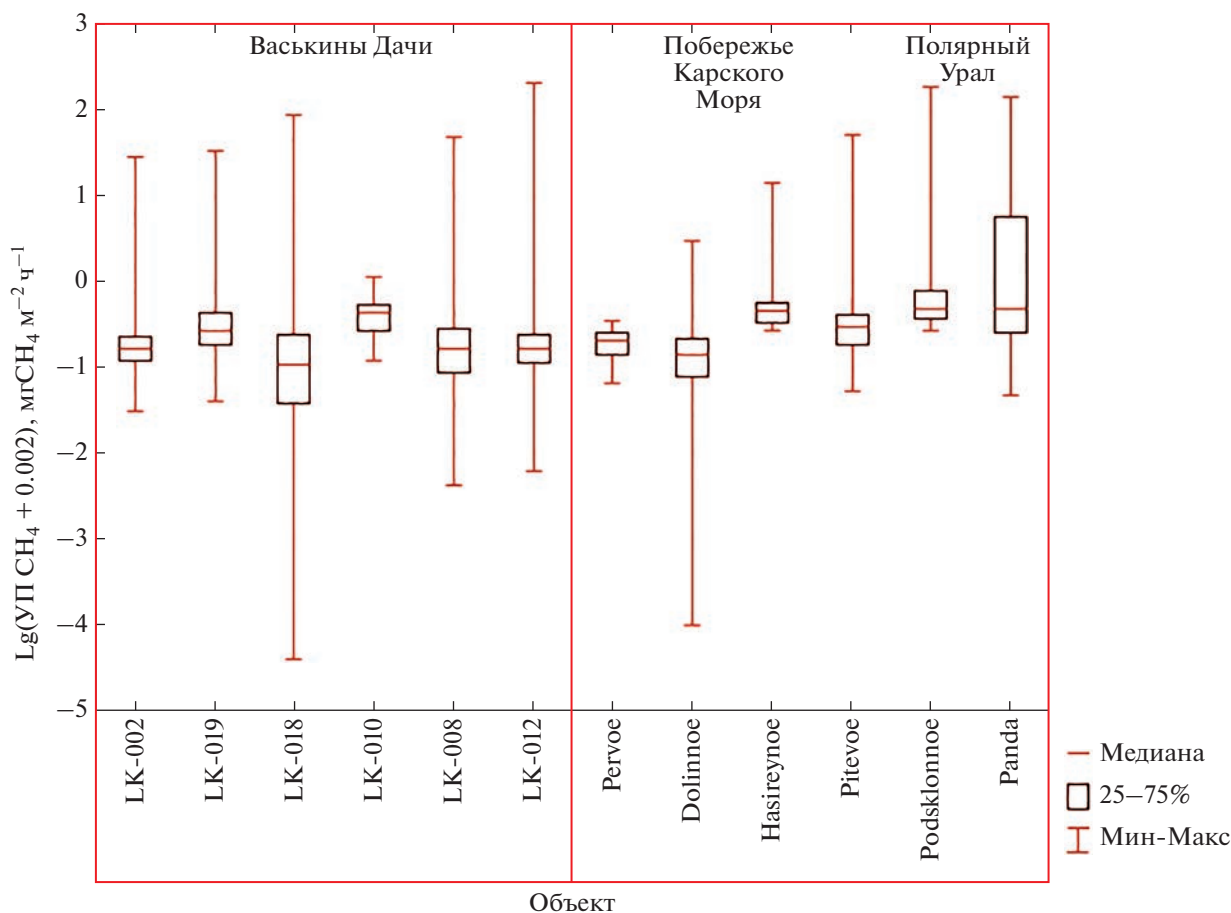


Рис. 2. Диаграммы размаха значений УП метана, измеренных на 12 перечисленных озерах в трех районах измерений.

деле “Материалы и методы”. Такая большая выборка значений позволила провести статистический анализ полученных данных, выявить общие закономерности распределения УП метана из исследованных водных объектов, а также определить влияние факторов окружающей среды на величину УП метана на границе “вода – атмосфера”.

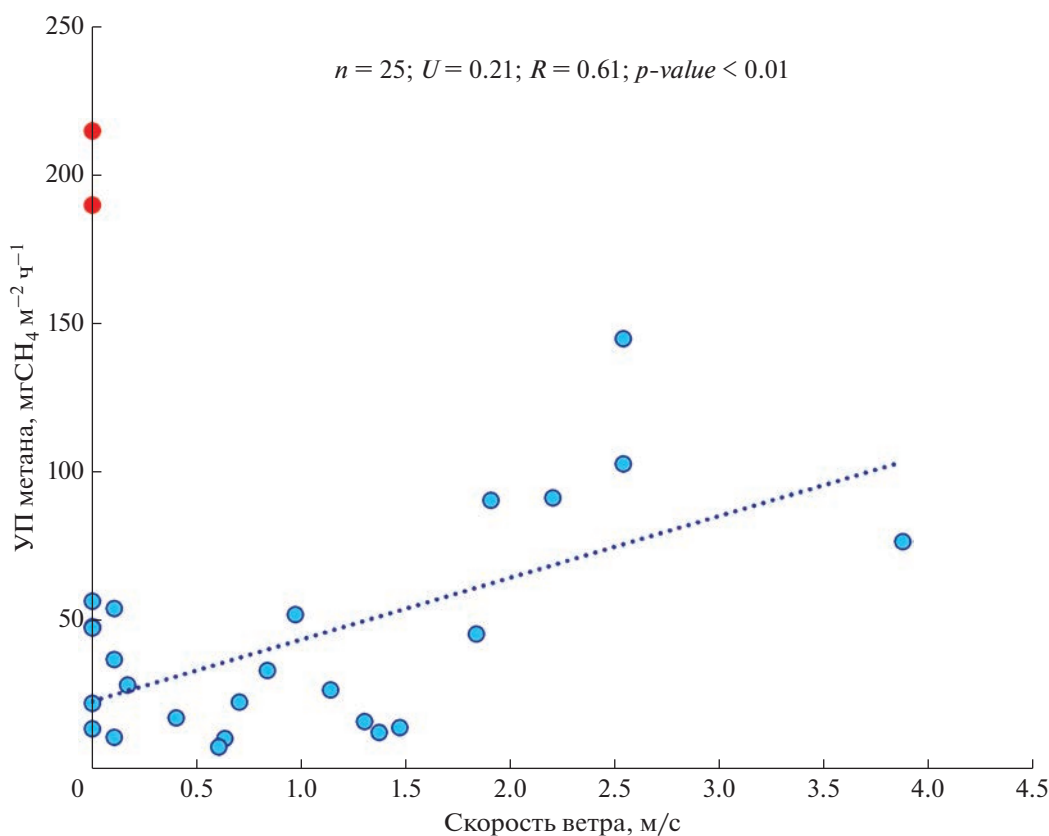
Для графической иллюстрации полученных выборок на рис. 2 представлена диаграмма размаха для значений УП метана, измеренных со всех перечисленных озер (данные для близкорасположенных сообщающихся озер Панда и Ухо-Правое объединены в один массив, а для озера, на котором велись суточные измерения, в данную диаграмму включены только дневные значения для сопоставимости с остальными объектами).

95% измеренных УП небольшие по величине и не превышают  $8 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ . Оценка величины диффузионной составляющей УП метана в атмосферу по методу TVL позволила сделать вывод, что для значений выше  $8 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  доля диффузионной составляющей не превышает 4%, в то время как для потоков менее  $8 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  доля

диффузионного УП, оцененного по TVL, составляет 51, 38 и 48% в среднем для районов Васькины Дачи, Побережье Карского моря и Полярный Урал соответственно.

Более высокие УП метана, измеренные на выбранных озерах, имеют очень большой разброс и обусловлены сразу несколькими факторами. В первую очередь это пузырьки метана, которые образуются в поровом растворе донных отложений (преимущественно донные отложения на описываемых водных объектах – это сапропель). После этого из-за высокой плавучести пузырьки быстро достигают поверхности воды. Таким образом метан, не подвергаясь окислению, эмитирует в атмосферу. Процесс образования пузырьков, их количество и размер, концентрация в них метана, попадание пузырька метана в камеру в именно момент измерения – определяются совокупностью факторов, имеющих преимущественно вероятностный характер. Это объясняет большие разбросы в значениях высоких УП метана из практически всех измеренных озер.

Кроме образования пузырьков метана в результате разложения органического вещества в



**Рис. 3.** Зависимость удельного потока метана в атмосферу (значения более  $8 \text{ mgCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ ) от приземной скорости ветра во время измерений на точках.

грунтах, высокие УП могут регистрироваться из-за присутствия в данных озерах сипов метана, которые были зафиксированы на некоторых точках измерения (например, озеро ЛК-008).

Значительных различий в высоких значениях УП метана между тремя изученными в данной работе районами выявлено не было. Однако, была выявлена значимая корреляция между высокими значениями УП метана в атмосферу (более  $8 \text{ mg CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ ) и скоростью ветра (рис. 3).

Все статистические критерии показывают статистическую значимость данной регрессии. Полученное уравнение для зависимости приведено в формуле (5):

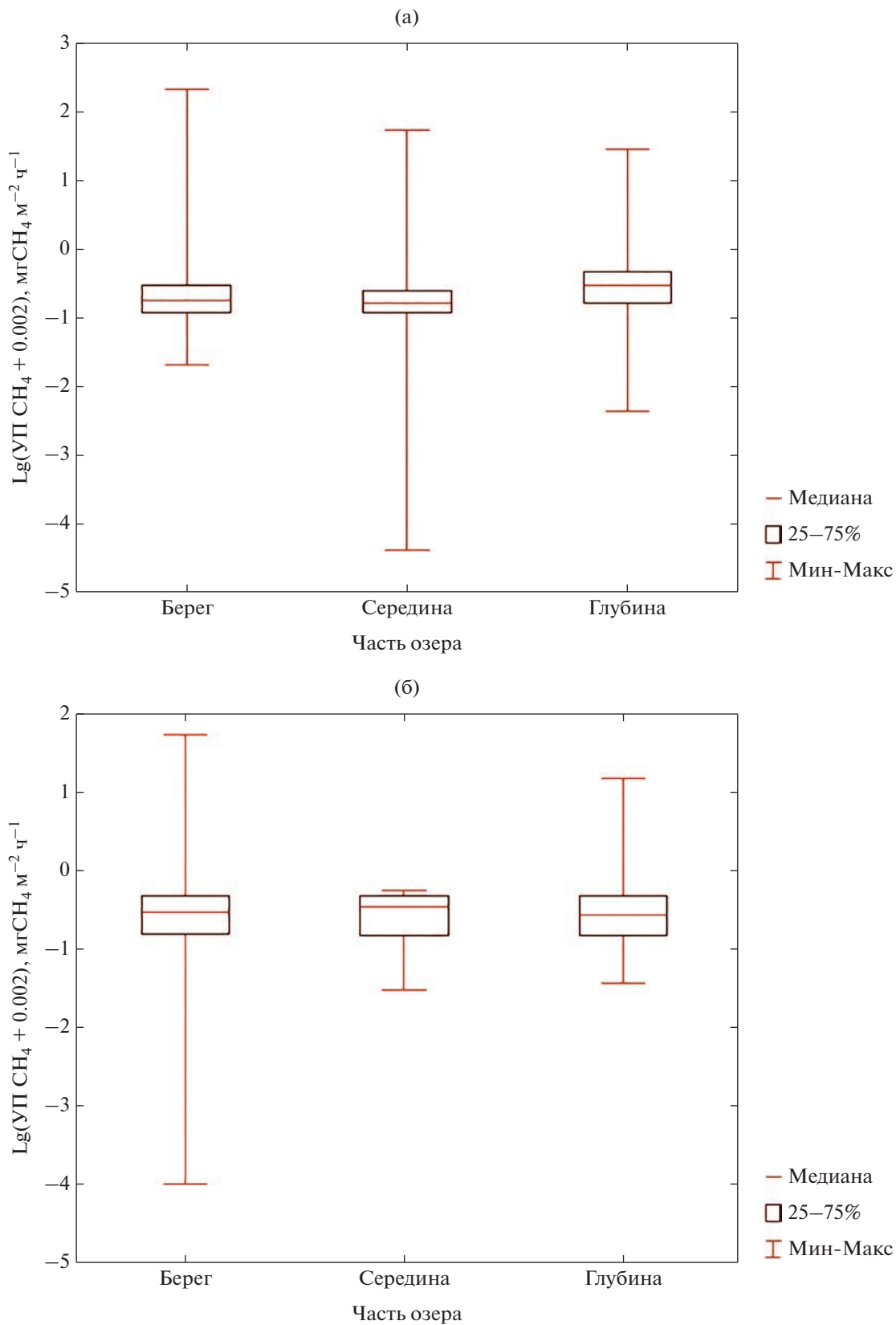
$$F_{\text{CH}_4} = 20.83V_{\text{wind}} + 23.09, \quad (5)$$

где  $F_{\text{CH}_4}$  – УП метана на границе “вода – атмосфера” ( $\text{mg CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ ),  $V_{\text{wind}}$  – приземная скорость ветра ( $\text{м с}^{-1}$ ).

Точки, отмеченные на рис. 3 красным цветом, соответствуют измерениям на озерах ЛК-012 и Подсклонное. Они были исключены из данной зависимости, так как, вероятно, эти высокие значения УП обусловлены метановыми сипами.

Для изученных озер также наблюдается связь между глубиной озера и УП метана в атмосферу. При разбиении всех точек наблюдений на озерах по районам и по глубинному положению (условно все точки были разбиты на участки “прибрежная часть”, “середина”, “глубина”) видно, что на более мелких точках наблюдаются большие значения УП метана в атмосферу, чем на глубоких участках (рис. 4).

Исключением из этой закономерности для всех измеренных УП является район Полярного Урала и озера Панда и Подсклонное. Однако, если обратить внимание на квартильный размах, то данная закономерность характерна и для данного района. Связана она с тем, что глубина выступает как лимитирующий фактор для УП метана в атмосферу – при большей глубине на дне возникает большее гидростатическое давление, что препятствует образованию и выходу к поверхности воды пузырьков метана, так как растворимость метана при этом возрастает. Кроме того, при прохождении метана в водной толще от донных отложений к поверхности, часть его будет окислена, и также часть пузырьков метана растворится и перейдет в диффузионную составляющую. Чем больше глубина, тем большее расстояние необходимо



**Рис. 4.** Диаграммы размаха УП метана: распределение по глубинным участкам в трех районах проведения измерений (а – Васькины Дачи; б – Побережье Карского моря; в – Полярный Урал).



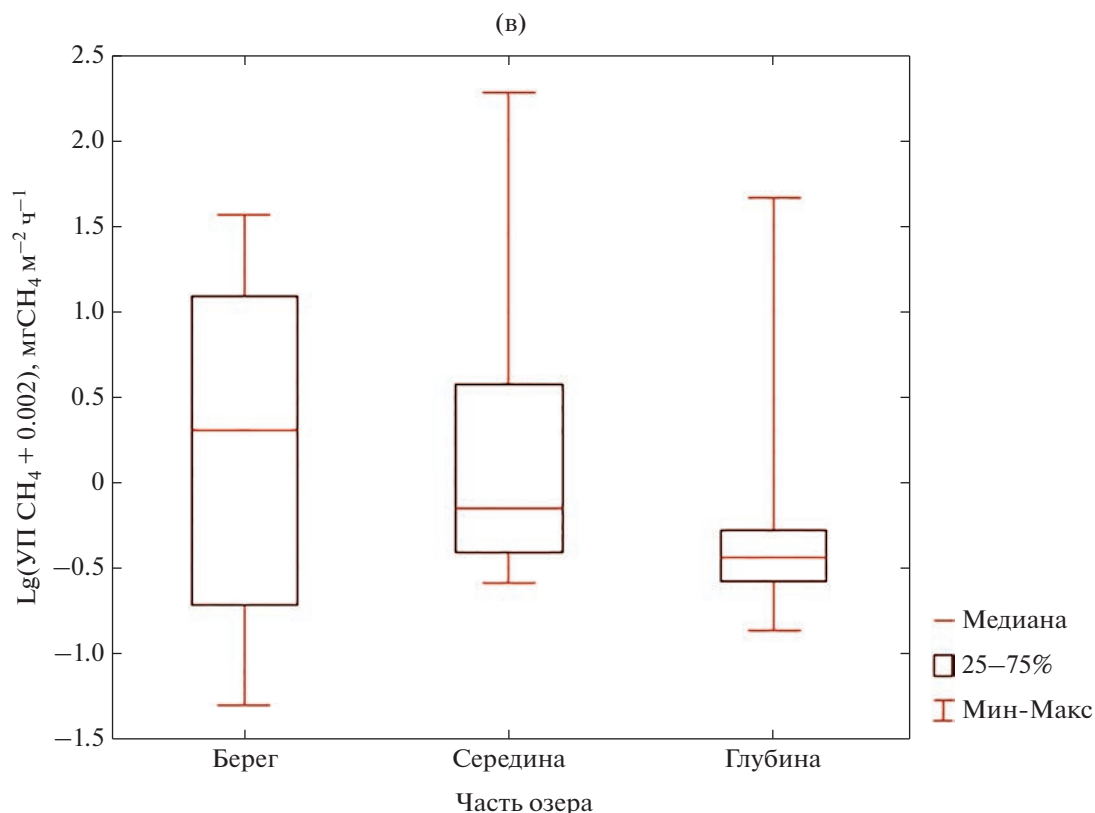


Рис. 4. Окончание

пройти метану от дна к поверхности — тем больше метана может быть окислено в водной толще, и глубина является одним из лимитирующих факторов для УП метана.

### 3.2. Суточная динамика

Суточная динамика УП метана на озере ЛК-002, описываемая функцией (4), графически отображена на рис. 5, коэффициенты уравнения приведены в табл. 3.

Коэффициент несовпадения Тейла  $U$  для данной модели составляет 0.138, что говорит о достаточно хорошем качестве аппроксимации. При этом, если вместо температуры воздуха использовать температуру придонного слоя осадков ( $^{\circ}\text{C}$ ), качество аппроксимации незначительно улучшится ( $U = 0.136$ ), однако мы считаем в таком слу-

чае более целесообразным использовать температуру воздуха в качестве переменной, так как ее значения может быть проще получить в полевых условиях, особенно если речь идет о долговременных рядах наблюдений. Однако стоит отдельно отметить, что полученная зависимость на текущем этапе может быть использована в первую очередь для характеристики полученного массива данных, а для потенциальной экстраполяции требуется ее усовершенствование с использованием долговременных рядов наблюдений.

### 3.3. Оценки эмиссий

В табл. 4 приведены полученные нами оценки эмиссий для всех изученных озер с использованием рассчитанных характеристических величин УП для диффузионного и пузырькового типа эмис-

**Таблица 3.** Численные значения параметров уравнения (4) для озера ЛК-002 на ключевом участке “Васькины Дачи”

Независимая переменная	Коэффициент уравнения с его стандартной ошибкой		
	$b_1$	$b_2$	$b_3$
Температура воздуха	$0.065 \pm 0.009$	$0.004 \pm 0.001$	$-3.142 \pm 0.790$
Температура дна	$0.078 \pm 0.008$	$0.004 \pm 0.001$	$-3.028 \pm 0.795$

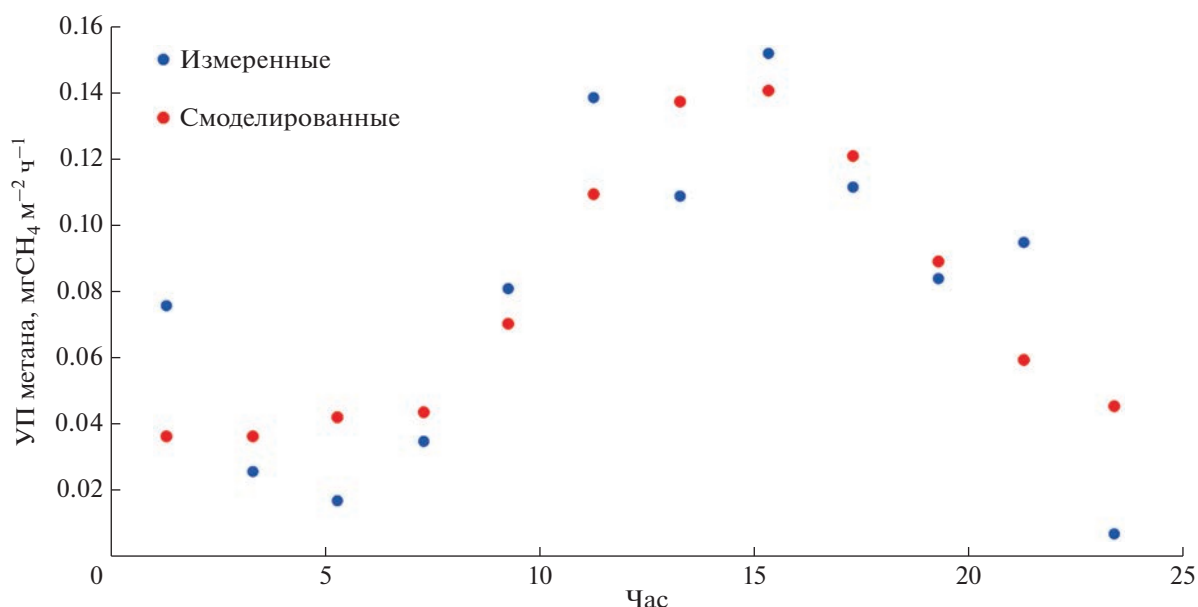


Рис. 5. Суточная динамика УП метана из озера на ключевом участке “Васькины Дачи” (экспериментальные и смоделированные значения).

сии. Интересно, что УП, нормированные на площадь озера, и средние значения УП, полученные в результате прямых камерных наблюдений, очень близки по величине, что говорит нам о том, что как минимум для исследованных нами озер

средний измеренный УП также можно использовать для оценки эмиссии. Полученные оценки варьируют от  $0.23 \text{ г CH}_4 \text{ ч}^{-1}$  для небольшого (но не самого малого по площади среди изученных) озера на участке “Побережье Карского моря” до

Таблица 4. Оценки эмиссии метана из исследованных озер тундры Западной Сибири (ключевые участки расположены с севера на юг, озера внутри групп расположены по возрастанию площади)

Озеро	Медианный расчетный диффузионный УП, $\text{мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$	Средний расчетный пузырьковый УП, $\text{мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$	Эмиссия с озера, $\text{г CH}_4 \text{ ч}^{-1}$	УП, нормированный на площадь озера, $\text{мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$	Средний по камерным измерениям УП, $\text{мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$
Васькины Дачи					
LK-012	0.07	3.85	86.89	3.91	3.91
LK-002	0.06	0.94	32.53	1.01	1.01
LK-010	0.24	0.15	16.53	0.39	0.43
LK-018	0.03	4.94	639.79	4.98	4.98
LK-019	0.10	1.12	184.89	1.22	1.21
LK-008	0.07	1.79	775.38	1.85	1.88
Побережье Карского моря					
Первое	0.09	0.12	0.23	0.21	0.21
Питьевое	0.10	3.60	7.40	3.70	3.70
Долинное	0.05	0.26	5.83	0.30	0.30
Хасырейное	0.09	0.95	63.21	1.04	1.04
Полярный Урал					
Подсклонное	0.25	1.59	0.73	1.83	1.91
Ухо-правое	0.40	30.24	18.38	30.63	30.63
Панда	0.08	18.50	104.04	18.58	18.57

775.38 г  $\text{CH}_4 \text{ ч}^{-1}$  для озера с самой большой площадью ЛК-008 на “Васькиных Дачах”.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Как можно видеть из результатов исследования, для большинства станций измерений величина УП метана невелика. Значения УП метана достаточно низкие по ряду причин. В первую очередь, необходимо отметить невысокие температуры воды – средние значения температур составляют около  $12^\circ\text{C}$  за все измерения. При этом температура имеет незначительную пространственную динамику: наибольшее значение составляет  $15^\circ\text{C}$ , наименьшее  $8.5^\circ\text{C}$ . Такие относительно невысокие температуры воды не создают оптимальных условий для того, чтобы происходила активная генерация метана в донных отложениях.

Также из-за того, что озера неглубокие и хорошо перемешаны (наибольший градиент температуры наблюдался на озере ЛК-012 – около  $0.5^\circ\text{C}$  на метр – гомотермия), они полностью насыщены кислородом, который практически не расходуется в толще воды из-за низкой биологической активности тундровых озер. Так как метан может накапливаться в воде при анаэробных условиях (содержание кислорода менее  $1 \text{ мг л}^{-1}$ ), при наблюдаемом минимальном содержании в  $7.05 \text{ мг O}_2 \text{ л}^{-1}$  метан в водной толще быстро окисляется метанотрофами. По указанным причинам для данных озер не было выявлено зависимостей между УП метана в атмосферу и температурой воды или содержанием растворенного кислорода.

Результаты измерений значений УП метана хорошо согласуются с данными ранее проведенных на севере Западной Сибири исследований. Так, в работе [Голубятников и Казанцев, 2013] приведены значения УП метана, характерных для тундровых озер верховьев р. Таз и Гыданского полуострова, в диапазоне  $0.24\text{--}2.93 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ . Полученные в нашей работе УП метана также соответствуют диапазону значений, характерных для озер тундры в районе устья р. Таз [Kazantsev et al., 2018]. В этом исследовании показано, что средние значения УП метана в четырех озерах составляют  $0.61\text{--}1.24 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ . При этом все проведенные в тундровой зоне Западной Сибири исследования эмиссии метана с поверхности озер, включая настоящую работу, показывают в целом более высокие значения УП метана, нежели с озер Большеземельской тундры. Так, в работе [Забелина и др., 2017] приведены диффузионные УП метана в интервале  $0.01\text{--}0.87 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ , что соответствует значениям  $0.0004\text{--}0.04 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ .

В ходе анализа полученных результатов удалось выявить статистически значимую зависи-

мость УП метана от скорости приземного ветра (рис. 3). Данная зависимость проявляется на выбранных водных объектах, поскольку они имеют очень небольшую глубину (в среднем до 3 м). При полном отсутствии стратификации ветровое воздействие легко перемешивает водную толщу полностью, из-за чего будет происходить взмучивание донных отложений. Сапропель очень подвержен этому явлению, поэтому пузырьки, находящиеся в донных отложениях, будут активно выделяться в атмосферу. Чем интенсивнее ветровое воздействие и, как следствие, взмучивание, тем интенсивнее будет происходить высвобождение пузырьков, а УП метана будет больше.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования получен и проанализирован большой массив значений УП метана в совокупности с факторами окружающей среды, потенциально оказывающих влияние на интенсивность эмиссии.

Прослеживается временная и пространственная изменчивость эмиссий. Суточные изменения интенсивности эмиссии метана хорошо аппроксимируются гармонической функцией, где независимыми переменными выступают температура воздуха и время суток.

Приведенные в этой статье результаты могут впоследствии быть использованы при расчете региональных оценок эмиссии метана и в математических моделях, описывающих и прогнозирующих особенности функционирования атмосферы и климата.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Обработка данных и расчеты выполнены в рамках госзадания ИФА РАН 1022030400001-9 “Мониторинг и анализ динамики эмиссии парниковых газов из наземных и пресноводных экосистем арктической зоны России”. Полевые работы на стационаре “Васькины Дачи” проведены при поддержке Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН (г. Тюмень) и НП “Российский центр освоения Арктики” (г. Салехард).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.С. и др. Эмиссия метана из болотных ландшафтов тундры Западной Сибири // Вестник ТГПУ. 2010а. № 3(93). С. 78–86.
- Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. Измерение газообмена на границе почва/атмосфера. Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2010б. 96 с.
- Голубятников Л.Л., Казанцев В.С. Вклад тундровых озер Западной Сибири в метановый бюджет атмо-

- сферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 4. С. 430–438.
- Забелина С.А., Широкова Л.С., Климов С.И. и др. Эмиссия метана с поверхности термокарстовых озер болшеземельской тундры // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития. 2017. С. 152–153.
- Ребристая О.В., Хитун О.В. Ботанико-географические особенности флоры Центрального Ямала // Ботанический журнал. 1998. Т. 83. № 7. С. 37–52.
- Юрцев Б.А., Толмачев А.И., Ребристая О.В. Флористическое ограничение и разделение Арктики // Арктическая флористическая область / Под ред. Юрцева Б.А. Ленинград: Наука, 1978. С. 9–104.
- Bastviken D., Cole J.J., Pace M.L., Van de Bogert M.C. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole lake budgets and CH<sub>4</sub> emissions // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № G2. G02024. <https://doi.org/10.1029/2007JG000608>
- Bastviken D., Santoro A.L., Marotta H. et al. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // Environ. Sci. Technol. 2010. V. 44. № 14. P. 5450–5455.
- Bazhin N. Methane Emission from Bottom Sediments // Chem. Sustain. Dev. 2003. V. 11. P. 577–580.
- CAVM Team. Circumpolar Arctic Vegetation Map. (1 : 7,500,000 scale), Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF). Map № 1. 2003.
- Cole J.J., Caraco N.F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF<sub>6</sub> // Limnol. Oceanogr. 1998. № 43. P. 647–656.
- Dvornikov Y., Leibmann M., Heim B. et al. Geodatabase and WebGIS project for long-term permafrost monitoring at the VaskinyDachi Research Station, Yamal, Russia // Polarforschung. 2016. V. 85. № 2. P. 107–115.
- Dvornikov Y.A., Leibmann M.O., Heim B. et al. Thermodegradation on Yamal peninsula as a source of the dissolved organic matter increase in thaw lakes // Earth's Cryosph. 2017. V. 21. № 2. P. 28–37.
- Esri, Garmin, HERE, GEBCO, NOAA, National Geographic, Geonames.org et al. 2020. ESRI World Ocean Base [Online map]. URL: [https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/Ocean/World\\_Ocean\\_Base/MapServer/tile/%7Bz%7D/%7By%7D/%7Bx%7D](https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/Ocean/World_Ocean_Base/MapServer/tile/%7Bz%7D/%7By%7D/%7Bx%7D) (22.12.2022).
- UNESCO/IHA GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs / Goldenfum J.A. (Ed.). International Hydropower Association (IHA): London, UK, 2010. 138 p. URL: <https://www.hydropower.org/publications/ghg-measurement-guidelines-for-freshwater-reservoirs> (30.01.23).
- Gruca-Rokosz R., Tomaszek J. Methane and Carbon Dioxide in the Sediment of a Eutrophic Reservoir: Production Pathways and Diffusion Fluxes at the Sediment–Water Interface // Water Air Soil Pollut. 2015. V. 226. P. 16–32.
- Guerin F., Abril G. Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. P. 3006–3020.
- Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O'Malley M. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission // Environ. Sci. Technol. 2017. V. 51. № 3. P. 1267–1277.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Masson-Delmotte V et al. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. 2391 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kazantsev V.S., Krivenok L.A., Cherbunina M.Yu. Methane emissions from thermokarst lakes in the southern tundra of Western Siberia // Geogr. Environ. Sustain. 2018. V. 11. № 1. P. 58–73.
- Klaus M., Vachon D. Challenges of predicting gas transfer velocity from wind measurements over global lakes // Aquat. Sci. 2020. V. 82. № 3. P. 53.
- Liss P.S., Slater P.G. Flux of gases across the air-sea interface // Nature. 1974. V. 247. P. 181–184.
- Milberg P., Tornqvist L., Westerberg L., Bastviken D. Temporal variations in methane emissions from emergent aquatic macrophytes in two boreonemoral lakes // AoB Plants. 2017. V. 9. № 4. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plx029>
- Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M. Methane Ebullition in Temperate Hydropower Reservoirs and Implications for US Policy on Greenhouse Gas Emissions // Env. Manag. 2017. V. 60. № 4. P. 615–629.
- Ostrovsky I., McGinnis D., Lapidus L., Eckert W. Quantifying gas ebullition with echosounder: the role of methane transport by bubbles in a medium-sized lake // Limn. and Oceanogr-Meth. 2018. V. 6. № 2. P. 105–118.
- Repo E., Huttunen J.T., Naumov A.V. et al. Release of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from small wetland lakes in western Siberia // Tellus B: Chem. Phys. Meteorol. 2007. V. 59. № 5. P. 788–796.
- Sabrekov A., Glagolev M., Kleptsova I., Maksyutov S. CH<sub>4</sub> emission from West-Siberia tundra mires // Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2011. V. 2. № 1. P. 1–16.
- Sander R. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 4399–4981. <https://doi.org/10.5194/acp-15-4399-2015>
- Savvichev A., Rusanov I., Dvornikov Yu. et al. The water column of the Yamal tundra lakes as a microbial filter preventing methane emission // Biogeosciences. 2021. V. 18. № 9. P. 2791–2807.
- Striegl R.G., Michmerhuizen C.M. Hydrologic influence on methane and carbon dioxide dynamics at two north-central Minnesota lakes // Limnol. Oceanogr. 1998. V. 43. P. 1519–1529. <https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.7.1519>
- Theil H. Economic forecasts and policy. North-Holland Pub Co, Amsterdam, 1958. 562 p.
- Utsumi M., Nojiri Y., Nakamura T. et al. Dynamics of dissolved methane and methane oxidation in dimictic Lake Nojiri during winter // Limnol. Oceanogr. 1998. V. 43. P. 10–17. <https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.1.0010>

## Methane Emission from Lakes in the North of Western Siberia

V. S. Kazantsev<sup>1, \*</sup>, L. A. Krivenok<sup>1</sup>, Yu. A. Dvornikov<sup>1, 2</sup>, V. A. Lomov<sup>1</sup>, and A. F. Sabrekov<sup>1, 3</sup>

<sup>1</sup>*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per., 3, Moscow, 119017 Russia*

<sup>2</sup>*Department of Landscape Design and Sustainable Ecosystems, Agrarian-Technological Institute, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, 117198 Russia*

<sup>3</sup>*Yugra University, Chekhova str., 16, Khanty-Mansiysk, 628012 Russia*

*\*e-mail: kazantsev@ifaran.ru*

The paper presents the results of field measurements of methane fluxes into the atmosphere from thermokarst lakes located on the Russian Federation territory on the three key sites: foothills of the Polar Urals, coast of the Kara Sea and the northwestern part of the Yamal Peninsula. A total of 13 lakes were studied and about 500 methane fluxes were measured by the floating chamber method. The results showed most of the fluxes does not exceed  $8 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . For more significant values, a statistically significant correlation with the wind speed was revealed, which largely determines the intensity of gas exchange on the “water-atmosphere” boundary. The exceptions are measurements in zone of lake methane seeps. For most lakes, the greatest scatter of measured fluxes was observed in the shallow part. The diurnal dynamics of methane fluxes was approximated by a sinusoidal function. For the lakes presented in the work, the range of emission assessment is  $0.23\text{--}775.38 \text{ g CH}_4 \text{ h}^{-1}$ . Obtained results are important material for estimating regional methane emission from the surface of thermokarst lakes in the tundra zone.

**Keywords:** greenhouse gases, freshwater ecosystems, fluxes, diurnal dynamics, carbon balance