

УДК 556.55

© В. М. Степаненко^{1,2*}, В. А. Ломов^{1,3}, М. Г. Гречушникова^{1,4}, 2022

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
119991, ул. Ленинские горы, д. 1, г. Москва, Россия

²Московский центр фундаментальной и прикладной математики, г. Москва, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова, Российская академия наук,
119017, Пыжевский пер. 3, стр. 1, г. Москва, Россия

⁴Институт водных проблем, Российская академия наук, 119333, ул. Губкина, д. 3, г. Москва, Россия

*stepanen@srcc.msu.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭМИССИИ МЕТАНА ИЗ МОЖАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Статья поступила в редакцию 14.12.2021, после доработки 01.05.2022, принята в печать 17.10.2022

Аннотация

Получены оценки эмиссии метана с поверхности Можайского водохранилища за период с 2015 по 2019 гг. с помощью математической модели LAKE2.3. Среднее значение эмиссии составляет 361 тС в год, средний удельный поток — 37,7 мгС—CH₄ м⁻² день⁻¹, что удовлетворительно согласуется с данными наблюдений. Наибольший вклад в общую эмиссию CH₄ вносит пузырьковая составляющая. В течение периода нагревания наблюдается постепенное увеличение эмиссии метана с максимумом перед началом осеннего перемешивания. В ходе численных экспериментов с моделью установлено, что высокочастотная изменчивость потоков метана в атмосферу связана с колебаниями атмосферного давления и резкими изменениями уровня воды при том, что наиболее значимые выбросы связаны с последним фактором. Эффективным способом для калибровки диффузной составляющей потока метана в атмосферу является потенциальная наибольшая скорость окисления метана в реакции Михаэлиса–Ментен, а для пузырькового потока — параметр температурной зависимости генерации метана в донных отложениях q_{10} . Исследование чувствительности эмиссии метана к указанным параметрам проведено на основе численной модели LAKE2.3.

Ключевые слова: водохранилища, метан, математическое моделирование, эмиссия метана

© V. M. Stepanenko^{1,2*}, V. A. Lomov^{1,3}, M. G. Grechushnikova^{1,4}, 2022

¹Lomonosov Moscow State University, 119991, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia

²Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

³A.M. Obukhov Institute of Atmosphere Physics, Russian Academy of Sciences,
119017, Pyzhevsky per., 3/1, Moscow, Russia,

⁴Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, 119333, Gubkina st., 3, Moscow, Russia

*stepanen@srcc.msu.ru

NUMERICAL SIMULATION OF TEMPORAL VARIABILITY OF METHANE EMISSIONS FROM MOZHAYSK RESERVOIR

Received 14.12.2021, Revised 01.05.2022, Accepted 17.10.2022

Abstract

Estimates of methane emission from the Mozhaysk reservoir surface were carried out using the mathematical model LAKE2.3. The average emission value is 361 tC per year, the average flux = 37.7 mgC—CH₄ m⁻² day⁻¹. Comparison of the obtained estimates with *in situ* measurements revealed, that the methane emission and specific flux according to the model are in good agreement with the observations data. The ebullition makes the largest contribution to the total emission. During the heating period, an increase of methane emission is observed with a maximum before the autumn mixing stage. In the course of numerical experiments with the model, it was found that the amplitude of methane fluxes into the atmosphere is associated with fluctuations in atmospheric pressure, and the most significant emissions peaks associated with water level drawdowns. Effective method for calibrating the

Ссылка для цитирования: Степаненко В.М., Ломов В.А., Гречушникова М.Г. Численное моделирование временной изменчивости эмиссии метана из Можайского водохранилища // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 82–100. doi:10.48612/fpg/umx3-6tet-vhkr

For citation: Stepanenko V.M., Lomov V.A., Grechushnikova M.G. Numerical Simulation of Temporal Variability of Methane Emissions from Mozhaysk Reservoir. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 82–100. doi:10.48612/fpg/umx3-6tet-vhkr

diffusion component of the methane flux into the atmosphere is the potential rate of methane oxidation in the Michaelis-Menten reaction, and for ebullition it is the methane generation parameter in bottom sediments — q_{10} . For the described numerical experiments, the article presents the values of the annual emissions of methane into the atmosphere.

Keywords: artificial reservoirs, methane, mathematical modeling, methane emission

1. Введение

К наиболее важным парниковым газам в атмосфере относятся углекислый газ и метан. Метан весьма значим для парникового эффекта, поскольку имеет высокий потенциал глобального потепления в расчёте на одну молекулу, в 28 раз превышающий потенциал диоксида углерода [1]. Кроме того, относительные темпы роста содержания метана в атмосфере значительно превышают таковые для CO_2 и N_2O (167 % — рост среднеглобальной приземной концентрации метана относительно доиндустриального периода против 46 % для CO_2 и 24 % для N_2O [2]).

Источники метана в атмосфере разделяют на природные и антропогенные. К важнейшим природным источникам относятся болота, озера и лесные экосистемы (особенно тропического пояса). Антропогенные источники метана в атмосфере — это свалки твёрдых бытовых отходов, сельское хозяйство (в особенности рисовые поля и пастбища крупного рогатого скота), промышленность, разработки газовых и нефтяных месторождений и т.д. [3]. Заметным антропогенным источником метана для атмосферы являются также искусственные водоемы.

По различным оценкам эмиссия метана из этих объектов составляет от 2 до 122 Тг/год, или от 0,5 до 10 % от суммарного потока метана в атмосферу с земной поверхности [4–8]. Оценки глобальной эмиссии метана с водохранилищ значительно различаются, что связано с методикой расчёта, а также с различием используемых наборов данных. Методики расчёта предполагают экстраполяцию статистических связей, полученных на исследованных объектах, на неизученные водохранилища, например, по признаку принадлежности к одной и той же климатической зоне [7]. Это существенно ограничивает точность глобальных оценок.

Более обоснованная методика оценки эмиссии CH_4 с поверхности водных объектов, не охваченных измерениями или покрытых ограниченным набором измерений, заключается в математическом моделировании ключевых процессов образования, потребления, переноса и эмиссии метана из водоёма. Модель необходимо протестировать и откалибровать на тех водохранилищах, где пространственно-временная неоднородность потоков метана детально изучена. Определив значения наиболее важных параметров модели и рассчитав временной ход потоков метана на границе «вода–атмосфера», можно получить уточнённые оценки потока метана для водоемов, при наличии информации об их основных морфометрических, гидрологических, экологических и климатических характеристиках.

Такие оценки могут быть получены с помощью одномерной термогидродинамической модели с блоком расчета биогеохимических процессов LAKE [9–10]. Модели такого типа использовались ранее для оценки эмиссии метана из слабопроточных озёр естественного происхождения [11–17]. В то же время, искусственные водные объекты характеризуются значительной горизонтальной неоднородностью распределения как физических, так и биогеохимических переменных. Поэтому основной задачей настоящего исследования является оценка применимости одномерного (по вертикали) подхода к воспроизведению концентрации и потоков метана в водохранилищах на примере модели LAKE.

Для того, чтобы адаптировать модель к особенностям гидролого-гидрохимического режима водохранилищ, необходима верификация результатов расчётов на хорошо изученном водном объекте. В качестве такого объекта было выбрано Можайское водохранилище. В данной работе представлены результаты оценок эмиссии метана с Можайского водохранилища по натурным данным и по расчетам модели LAKE, а также возможные пути улучшения качества моделирования на основе сравнения модельных результатов с натурными данными, для получения более точных оценок эмиссии метана с искусственных водоемов.

Во Введении приводятся общие сведения о процессах, обуславливающих потоки метана в водной толще и на поверхности водного объекта; в разделе Материалы и методы описаны основной объект исследования — Можайское водохранилище, методы инструментальных наблюдений и модель LAKE; в Результаты и обсуждении представлены результаты расчета эмиссии метана из Можайского водохранилища, сопоставление с эмпирическими данными, а также оценка влияния ряда факторов на эмиссию метана на основе численных экспериментов с моделью.

1.1. Метан в экосистеме водохранилищ

Основной источник метана в водной толще — это анаэробное разложение органического вещества в грунтах (рис. 1).

Даже небольшое наличие кислорода в придонных горизонтах может ингибировать деятельность архей — главных агентов анаэробной (при отсутствии кислорода) деструкции (разложении) органического вещества (ОВ) [18]. Основные пути образования метана в грунтах — это гидрогенотрофный (образование из HCO_3^- иона или CO_2) и ацетокластический (образование из CH_3COO^-) пути. Как правило, для верхней части донных отложений преобладает ацетокластическая цепочка разложения ОВ, а в более глубоких слоях основной вклад начинает вносить гидрогенотрофный путь [19].

Кроме того, важен состав ОВ, поступающего к донным отложениям — при поступлении лабильной (быстрорастворимой) органики продукция метана значительно ускоряется [21].

Метан, образованный в донных отложениях, может поступать к поверхности воды в виде двух основных составляющих потока: диффузного и пузырькового. Помимо образования метана непосредственно в донных отложениях, стоит отметить также образование его при разложении макрофитной растительности на мелководьях. Диффузный поток зависит от градиента концентрации растворенного в воде метана, а также коэффициента диффузии. При попадании в горизонты воды, насыщенные кислородом, метан подвержен окислению метанотрофными микроорганизмами. Около 90 % диффузного потока может окисляться при переносе к поверхности воды [22]. Из-за этого, содержание CH_4 увеличивается от поверхности к придонным горизонтам [23]. Скорость окисления метана в водной толще и в донных отложениях при наличии кислорода зависит от концентрации метана и кислорода [24].

Главное отличие пузырьковой составляющей потока метана состоит в том, что он достигает поверхности значительно быстрее диффузного и не подвержен окислению. Однако имеет место растворение пузырьков газа в водной толще, особенно пузырьков большого диаметра [25]. На пузырьковый поток метана существенное влияние оказывает глубина водоема, а также динамика уровня воды. Так, например, для водохранилищ характерны резкие сбросы уровня при регулировании стока. Резкое падение гидростатического давления при снижении уровня является причиной образования большого количества пузырьков в донных отложениях [26]. Сам уровень воды имеет большое значение для величины пузырькового потока — при меньшем расстоянии, которое проходит пузырек от донных отложений к поверхности, меньше доля молекул газа, перешедших в растворённую фазу и подвергнутых впоследствии окислению [27].

Важным показателем, влияющим на потоки метана в водохранилище, является его трофность — характеристика биопродуктивности водоемов. Увеличение фосфорной нагрузки на водоем и росте содержания хлорофилла в воде, по результатам существующих оценок, приводят к увеличению эмиссии метана из водоемов суши на 30–90 % и даже может приблизить озера и водохранилища к болотам по значениям годового выброса метана в атмосферу [28]. Для водоемов повышенного трофического уровня, наибольшее увеличение эмис-

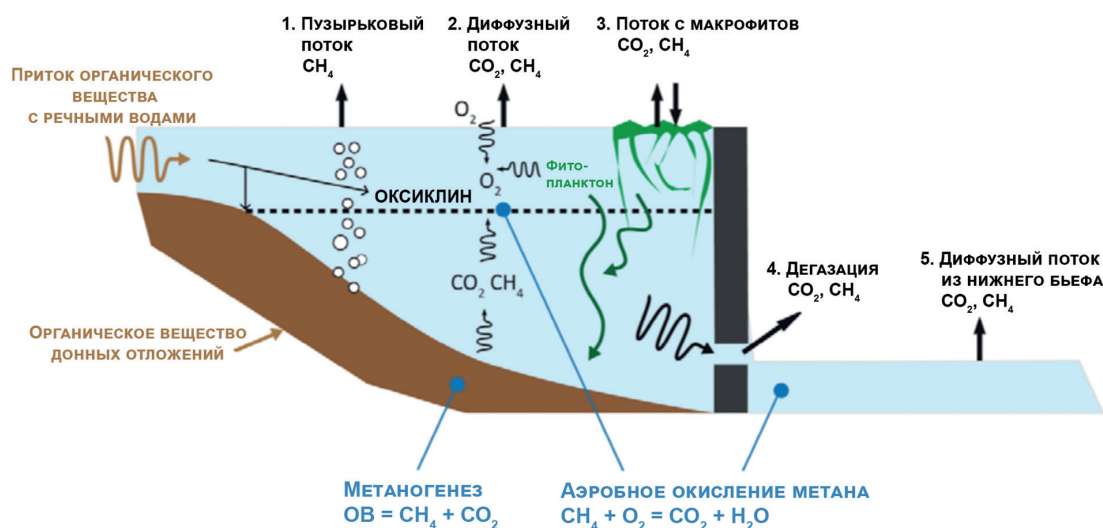


Рис. 1. Схема распределения потоков и преобразования метана в водохранилище [20]

Fig. 1. Scheme of methane fluxes distribution and its transformation in reservoir [20]

сии метана будет происходить при возникновении цветения водоемов, когда бурное развитие фитопланктона приводит к значительному увеличению первичной продукции [29]. При цветении значительно увеличивается скорость седиментации и количество поступающего лабильного ОВ ко дну, что приводит к быстрому истощению кислорода в придонных горизонтах и интенсификации анаэробного образования метана.

При рассмотрении эмиссии метана из водохранилищ также важно учитывать горизонтальные составляющие потока, помимо описанных выше вертикальных. Большой вклад в эмиссию метана для многих искусственных зарегулированных водоемов играет дегазация метана при сбросах воды в нижний бьеф гидроузлов. Для высокопроточных глубоких водохранилищ выход метана при дегазации может составлять около 70 % от эмиссии с поверхности воды [30].

2. Материалы и методы

2.1. Объект исследования

В качестве основного объекта исследования и проверки модели было выбрано Можайское водохранилище. Это небольшое морфологически простое долинное водохранилище в Московской области с замедленным водообменом (табл. 1).

Были выбраны пять опорных станций наблюдений над затопленным речным руслом для изучения пространственной неоднородности потоков метана в водоеме (рис. 2) [31]. Такое расположение станций измерений — на равномерном удалении друг от друга по длине всего водоема позволяет исследовать распределение изучаемых характеристик по продольному профилю от верховьев, подверженных влиянию втекающих рек, к зоне трансформации в среднем течении водоема и до нижней части с более спокойным озерным режимом. Кроме измерений над затопленным речным руслом реки Москвы, измерения также проводились и на других морфологических участках в пределах выделенных отсеков — над затопленной поймой и террасой долины реки.

Таблица 1

Table 1

Морфологические характеристики Можайского водохранилища (все характеристики приведены для нормального подпорного уровня (НПУ)) [31]

Morphological characteristics of Mozhaysk Reservoir (all characteristics are given for Full Supply Level (FSL)) [31]

| Длина, км | Наиб. ширина, м | Средняя ширина, м | Наиб. глубина, м | Площадь, км ² | Объем, км ³ | Размах колебаний уровня, м/год | Коэффициент водообмена, год ⁻¹ |
|-----------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------|---|
| 28 | 2,6 | 1,1 | 22,6 | 30,7 | 0,24 | 6 | 1,78 |

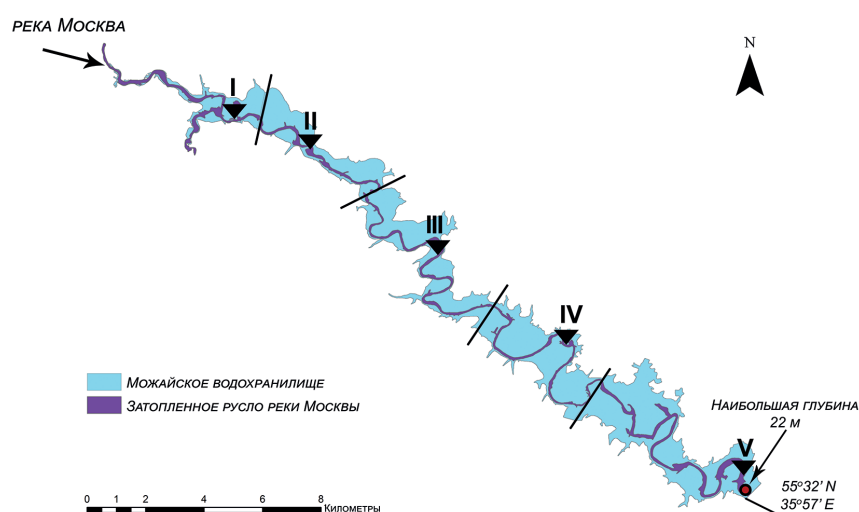


Рис. 2. Схема Можайского водохранилища с разделением на отсеки по критерию однородности гидро-морфологических условий. Римскими цифрами I–V показаны опорные станции наблюдений концентрации и потоков метана за 2016–2021 гг.

Fig. 2. Scheme of Mozhaysk Reservoir with separation by parts based on similar hydro-morphological conditions. Roman numerals I–V shows measurement stations locations during 2016–2021 years

2.2. Методы натурных наблюдений

В настоящей работе поток метана измеряется методом плавучих камер [20, 32]. Он основан на измерении разницы концентрации в камере, которая устанавливается на воду, в начале и в конце экспозиции. В работе использовались общая камера — для определения суммы пузырькового и диффузного потока, и диффузная, которая отличается наличием экрана, отсекающего пузырьковый поток. Время постановки камеры варьировалось от 30 мин до 1,5 ч. Одновременно с измерением потоков метана в атмосферу производился отбор проб воды на содержание растворенного метана с помощью метода «headspace» [20]. Отбирались пробы с поверхностного и придонного горизонтов, а также выше и ниже слоя наибольшего градиента плотности при наличии устойчивой температурной стратификации. Все измерения сопровождалось зондированием водной толщи приборами YSI ProODO и Pro30, в ходе которого измерялась температура воды, электропроводность, содержание растворенного в воде кислорода. Помимо этого, определялись температура воздуха, атмосферное давление, скорость ветра.

2.3. Модель LAKE: описание модели и постановки численных экспериментов

Модель LAKE — это одномерная (с частичным представлением горизонтальной неоднородности) термогидродинамическая модель с блоком расчета биогеохимических процессов, ответственных за формирование водной концентрации метана и углекислого газа. Модель применялась для расчёта термодинамического режима водохранилищ, а также содержания CO_2 [33] и CH_4 [10]. Для оценки потока из водохранилища была использована версия модели LAKE2.3, кратко изложенная ниже.

В настоящем разделе даётся общее описание математической модели со ссылками на публикации, в которых отдельные блоки изложены более подробно. Особое внимание уделено представлению в модели физических механизмов и биогеохимических эффектов, связанных с проточностью водоёма, поскольку они главным образом отличают версию модели 2.3 от предыдущих.

Одномерные по вертикали уравнения термогидродинамики и биогеохимии водоёма являются результатом операции осреднения по горизонтальному сечению водного объекта (рис. 3), применённой к трёхмерным уравнениям для горизонтальных компонент импульса, уравнению неразрывности, уравнению притока тепла, уравнениям баланса примесей.

Результирующий вид одномерного уравнения для скалярной величины f (в т. ч. любой из горизонтальных компонент скорости u , v) в несжимаемой жидкости имеет вид:

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial t} = -\frac{1}{A} \oint_{\Gamma_A} f \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dl - \frac{1}{A} \frac{\partial A \bar{w} \bar{f}}{\partial z} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left[A(k_T + k_m) \frac{\partial \bar{f}}{\partial z} \right] - \frac{1}{A} \frac{\partial A \bar{\Phi}_f}{\partial z} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dz} \left(F_{f, \Gamma_{A(z)}} + \Phi_{f, A(z)} \right) + \bar{R}, \quad (1)$$

где z — вертикальная координата, направленная вдоль силы тяжести, с началом на поверхности водоёма, t — время, $A(z)$ — горизонтальное сечение, $\Gamma_{A(z)}$ — замкнутая граница сечения $A(z)$, dl — элемент длины границы $\Gamma_{A(z)}$ (рис. 3), \mathbf{n} — внешняя нормаль к $\Gamma_{A(z)}$, $\mathbf{u} = (u, v)$ — горизонтальная составляющая скорости, w — вертикальная проекция скорости, F_f — суммарный диффузионный поток величины f за счёт турбулентности и молекулярного обмена, Φ_f — сумма недиффузионных и неадвективных потоков величины f (например, поток радиации в уравнении для температуры, пузырьковый поток в уравнениях для растворённых газов), $F_{f, \Gamma_{A(z)}}$, $\Phi_{f, \Gamma_{A(z)}}$ — значения соответствующих потоков на $\Gamma_{A(z)}$, т. е. на дне глубины z (в пределах $\Gamma_{A(z)}$ эти потоки принимаются постоянными), R — сумма всех членов исходного трёхмерного уравнения, кроме полной производной и дивергенции потоков (т. е. источники и стоки в уравнениях для биогеохимических веществ, градиент давления и сила Кориолиса — в уравнениях движения и т. д.). Уравнение (1) справедливо для случая дна с малыми уклонами (так что горизонтальными компонентами диффузионных потоков и вертикальной скоростью на дне можно пренебречь), а также для водоёма, образованного вертикальными стенками с нулевыми диффузионными потоками и горизонтальным дном. В контексте настоящего исследования проточного водоёма особый интерес представляют первое и второе слагаемые в правой части (1), поскольку они отвечают за привнесение, вынос величины f притоками и истоком и за адвекцию средней вертикальной скоростью, соответственно. Уравнения в форме (1) записываются для следующих величин:

- горизонтальные компоненты скорости;
- температура;
- солёность (минерализация);
- концентрация растворённого кислорода, метана;

— концентрация атомов углерода в составе следующих форм: живые органические частицы (фито- и зоопланктон), отмершие органические частицы (детрит), автохтонный и аллохтонный растворённый органический углерод, растворённый неорганический углерод;

— концентрация атомов фосфора в составе растворённого неорганического фосфора (фосфатов).

Уравнения вида (1) дополняются краевыми условиями на верхней и нижней границах. Так, для температуры задаётся уравнение теплового баланса на верхней границе ($z = 0$) и условие непрерывности температуры и потока тепла при $z = H$ (H — максимальная глубина водоёма). Тепловой баланс на поверхности рассчитывается при заданных временных рядах потоков коротковолновой, длинноволновой радиации и основных метеорологических величин (потоки явного, скрытого тепла и импульса вычисляются при этом по теории подобия Монина-Обухова [34, 35]).

Уравнение для средней вертикальной скорости получается осреднением по горизонтали уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial A\bar{w}}{\partial z} = - \oint_{\Gamma_A} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dl, \quad (2)$$

с условием непротекания $\bar{w}|_{z=H} = 0$.

С привлечением (2) получается уравнение для H :

$$\frac{dH}{dt} = r - E - \frac{1}{A(0)} \int_0^H \oint_{\Gamma_A} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dl dz + M, \quad (3)$$

которое выражает изменение уровня воды в результате неравенства расходов втекающих и вытекающих водотоков, атмосферных осадков r , испарения E с поверхности, а также процессов замерзания и таяния ледяного и снежного покрова (представлены слагаемым M).

Система, состоящая из одномерных уравнений типа (1) и уравнения неразрывности (2), замыкается с привлечением дополнительных гипотез и параметризаций [9]. Так, для расчёта коэффициентов турбулентной вязкости и температуропроводности (диффузии) используется турбулентное замыкание $k - \epsilon$; в выражение для коэффициента температуропроводности (диффузии) также аддитивно входит коэффициент «фоновой диффузии», представляющий перемешивание за счёт обрушения внутренних волн и других неучтённых в стандартных турбулентных замыканиях эффектов. Также важную роль играют параметризации потоков скалярных величин и импульса на поверхности дна $F_{f, \Gamma_{A(z)}}$, $\Phi_{f, \Gamma_{A(z)}}$ при $z < H$. Потоки тепла и метана на дне находятся путём решения дополнительных одномерных задач для температуры и метана в слоях (колонках) донных отложений, имеющих границу с водной средой на разных глубинах [9], в т. ч. на максимальной глубине, так что сумма этих границ составляет всё дно водоёма (рис. 3). Поток импульса через поверхность дна $\left(F_{u, \Gamma_{A(z)}}, F_{v, \Gamma_{A(z)}} \right)$ вычисляется по линейному или квадратическому по средней скорости (\bar{u}, \bar{v}) закону с калибровочным множителем.

Одномерная модель тепловлагопереноса в донных отложениях учитывает возможность фазовых переходов воды. Уравнение для концентрации метана в отложениях включает генерацию, молекулярную диффузию, удаление метана в виде пузырьков при превышении критического содержания [11].

Недиффузионные и неадвективные потоки Φ_f — это кинематический поток радиации $\Phi_T = S$ в уравнении притока тепла (рассчитывается по закону Бэра-Бутера-Ламберта в инфракрасном, фотосинтетически-активном¹, ближнем и дальнем инфракрасных диапазонах) и пузырьковый поток в уравнениях для концентраций растворённого кислорода, углекислого газа и метана. Модель пузырька основана на параметризациях из работы [36] и учитывает обмен между водной средой и пузырьком пятью газами: O_2 , CO_2 , CH_4 , N_2 , Ar .

Отдельная задача заключается в построении параметризаций для слагаемых \bar{R} в одномерных моделях. Так, параметризация осреднённого горизонтального градиента давления в уравнениях движения модели LAKE позволяет воспроизвести в модели сейши с горизонтальным волновым номером 1 [10]. Источники и стоки \bar{R} в уравнениях для биогеохимических величин задаются с привлечением параметризаций, предложенных в работах [15, 37–41] и учитывают следующие процессы:

— фотосинтез, дыхание, выделения и отмирание фито- и зоопланктона;

¹ Спектральный интервал фотосинтетически-активной радиации (ФАР) практически совпадает с интервалом видимого света, так что коэффициент ослабления ФАР в водной среде может быть с удовлетворительной точностью измерен визуальными методами, например, с применением диска Секки.

- аэробное разложение растворённых органических соединений и детрита;
- фотохимическое разложение растворённых органических соединений;
- аэробное окисление метана.

Поглощение растворённого кислорода донными отложениями с выделением растворённого неорганического углерода и фосфора выражаются членами $F_{f, \Gamma_{A(z)}}$ в уравнениях баланса этих величин согласно работе [42].

Представленная выше одномерная модель с частичным представлением горизонтальной неоднородности позволяет рассчитывать следующие потоки растворённых газов в атмосферу:

- диффузный поток с поверхности водоёма (коэффициент газообмена рассчитывается по модели обновления поверхности [43]);
- пузырьковые потоки, рассчитываемые отдельно над слоями донных отложений, находящимися на разных глубинах (рис. 3);
- адвективный поток через вытекающий водоток (турбины в случае гидроэлектростанций).

Модель включает многослойные модули расчёта переноса тепла и жидкой влаги в слоях льда и снега [44].

Концентрация метана в донных отложениях определяется интенсивностью четырех процессов: производством, окислением, пузырьковым стоком и диффузией.

$$\frac{\partial C_{CH_4}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z_s} \left(k_{CH_4} \frac{\partial C_{CH_4}}{\partial z_s} \right) + P_{soil, CH_4} - E_{soil, CH_4} - O_{soil, CH_4}. \quad (4)$$

Здесь P_{soil, CH_4} и \dot{A}_{soil, CH_4} — скорости производства и пузырькового стока метана соответственно, O_{soil, CH_4} — скорость аэробного окисления метана, C_{CH_4} — это концентрация метана в поровом растворе, k_{CH_4} — коэффициент вертикальной диффузии метана в донных отложениях, зависящий от температуры и «коэффициента извилистости», отвечающего за увеличение пути диффузии газа в донных осадках по сравнению с жидким раствором.

Основной субстрат для производства метана — это органическое вещество, осаждающееся на дно виде детрита или пеллет. Важной характеристикой этого субстрата является возраст донных отложений. Также важна температура, как определяющий фактор всех биологических процессов, и содержание растворенного кислорода, при котором ингибируется деятельность метаногенов. Таким образом может быть составлено уравнение:

$$P_{soil, CH_{4,i}} = P_{i,0} \rho_i^* H(T - T_{mp}) q_{10}^{T/10} (1 + \alpha_{O_2, inhib} C_{O_2})^{-1}, \quad (5)$$

где $P_{i,0}$ — это калибруемый параметр начальной скорости продукции метана. H — функция Хэвисайта, которая при температуре, меньшей 0°C обращается в 0, функция $q_{10}(T)$ отвечает за изменение скорости генерации метана в зависимости от температуры, $\alpha_{O_2, inhib}$ — константа ингибирования продуцирования метана (ингибирование линейно зависит от концентрации кислорода). ρ_i^* — плотность органической массы.

Математическое описание скорости окисления метана можно получить, используя кинетику ферментативных реакций Михаэлис — Ментен:

$$O_{CH_4} = V_{max} \exp \left[-\frac{\Delta E_{ox, CH_4}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \frac{C_{CH_4}}{K_{hs, CH_4} + C_{CH_4}} \frac{C_{O_2}}{K_{hs, O_2} + C_{O_2}}. \quad (6)$$

Стоит отметить, что реакция не лимитируется концентрациями продуктов реакции, так как их содержание в водоеме по отношению к количеству их образования в реакции настолько высоко, что этим ограничением можно пренебречь. Следовательно, в уравнении (6) рассматриваются только непосредственно метан и кислород. В кинетике ферментативных реакций учитывается максимальная скорость окисления метана V_{max} , энергия, необходимая для активации реакции $\Delta E_{ox, CH_4}$, и константы полунасыщения для кислорода K_{hs, O_2} и метана K_{hs, CH_4} .

Изменение содержания метана в водной толще описывается уравнением:

$$\frac{\partial C_{CH_4}}{\partial t} = Dif_A(C_{CH_4}) + \frac{F_{CH_{4,b}}}{A} \frac{dA}{dz} + B_{CH_4} + O_{CH_4}, \quad (7)$$

где $Dif_A(C_{CH_4})$ — скорость вертикальной диффузии метана (зависит преимущественно от разницы концентраций метана в соседних расчетных слоях), $F_{CH_{4,b}}$ — поток метана из донных отложений (с учетом

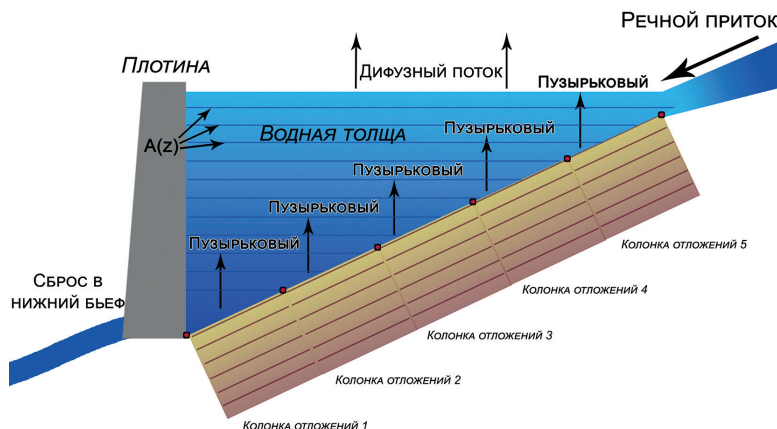


Рис. 3. Схема представления водной толщи и донных отложений в модели LAKE2.3. Синими линиями схематично показаны горизонтальные сечения водоема на расчетных уровнях модели, коричневыми столбцами изображены колонки донных отложений, расположенные на разных глубинах водоема

Fig. 3. Scheme of water body and bottom sediments presented in LAKE2.3 model. The blue lines schematically show the horizontal sections of the reservoir at the calculated levels of the model, the brown columns show the columns of bottom sediments located at different depths of the reservoir

площади примыкания каждой конкретной колонки грунтов к слою A_z см. рис. 3), B_{CH_4} — процессы, связанные с балансом «пузырька» и O_{CH_4} — окисление метана, рассчитываемое по кинетике Михаэлис-Ментен.

Система уравнений модели решается конечно-разностными методами.

Входные данные в модель подразделяются на гидрологическую (приток воды с крупными реками, уровень воды или водосброс через плотину) и метеорологическую (температура, влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра, нисходящие потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, осадки) информацию. Данные об уровне воды заимствовались из архива Можайской ГЭС, в качестве источника метеоданных использовался реанализ ERA5-Land. К этим данным вводилась корректировка по доступным рядам наземных наблюдений как на самом водохранилище, так и на ближайших метеорологических станциях [45].

Основной численный эксперимент с моделью LAKE проводился за период с 2015 по 2019 гг., при том, что период ноябрь — декабрь 2014 г. использовался в качестве периода взаимного приспособления переменных модели и адаптации к атмосферному воздействию. Шаг по времени модели — 10 с, шаг метеорологических данных — 1 ч, входная гидрологическая информация (расход притоков, уровень воды) — 1 сут, значения потока метана суммировались за каждый день. За начальные условия распределения температуры воды были приняты данные, полученные в ходе рейдовых наблюдений осенью 2014 г., относительное содержание кислорода в начальный момент задавалось 100 %, что справедливо для условий осенней гомотермии — однородного распределения температуры с глубиной. Начальная концентрация метана была задана 0, так как на тот момент времени соответствующих наблюдений не проводилось. В модели было задано 22 уровня по вертикали с шагом 1 м, что соответствует максимальной глубине водоема, 5 колонок донных отложений, равномерно распределенных по глубинам водоема, глубиной в 1 м каждая, шаг сетки внутри колонки — 10 см.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Оценка эмиссии метана по натурным наблюдениям

Годовой ход эмиссии метана на станции IV рассчитывается согласно описанным выше предположениям — отсутствие потока зимой, среднее значение для весеннего и осеннего периода, равное $2,4 \text{ мгС-CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$, летом поток метана измерен инструментально в ходе рейдовых наблюдений, между которыми его значения линейно интерполировались. Подробнее о пространственно-временной изменчивости потоков метана в Можайском водохранилище в летний период описано в публикации [46].

Основываясь на временной изменчивости потоков метана на станции IV в зависимости от уровня-го режима и других факторов возможно рассчитать среднее значение потока с поверхности Можайского водохранилища. Между измерениями летом значения потока линейно интерполировались. После этого умножались на площадь Можайского водохранилища за каждый день, таким образом получая значение суточной эмиссии метана, сумма составляла годовой выброс метана с поверхности Можайского водохранилища. Выброс метана за 2017–2019 гг. составил $347 \text{ тС-CH}_4 \text{ год}^{-1}$, $265 \text{ тС-CH}_4 \text{ год}^{-1}$ и $389 \text{ тС-CH}_4 \text{ год}^{-1}$ соответственно. Средний удельный поток метана с поверхности Можайского водохранилища составил $34,4 \text{ мгС-CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$.

3.2. Оценка эмиссии метана с помощью модели LAKE

Качество результатов модели оценивалось по 4 характеристикам — температура воды, растворенный в воде кислород, растворенный метан и потоки метана на границе «вода — атмосфера». Результаты расчета модели LAKE по этим параметрам сопоставлялись с рейдовыми наблюдениями, которые проводились в летние периоды 2016–2019 гг. на станции IV.

Результаты моделирования температуры воды сравнивались с данными измерений термоксы. Модель хорошо воспроизводит изменчивость температуры в верхнем перемешанном слое (рис. 4).

Температура на глубине 10 м воспроизводится хуже и сильно зависит от условий конкретного года. Наилучшие результаты получены для 2017 и 2016 гг., в то время как в 2018 и 2019 году в модели происходит более интенсивное перемешивание, не наблюдаемое в водоеме. Из-за этого придонные слои в модели прогреваются сильнее. Это связано с использованием в модели дополнительного коэффициента теплопроводности и диффузии в термоклине упрощенного вида, который не позволяет воспроизводить перемешивание в металимнионе (слой водной толщ с наибольшими градиентами характеристик по глубине при стратификации) одинаково хорошо при различном атмосферном воздействии.

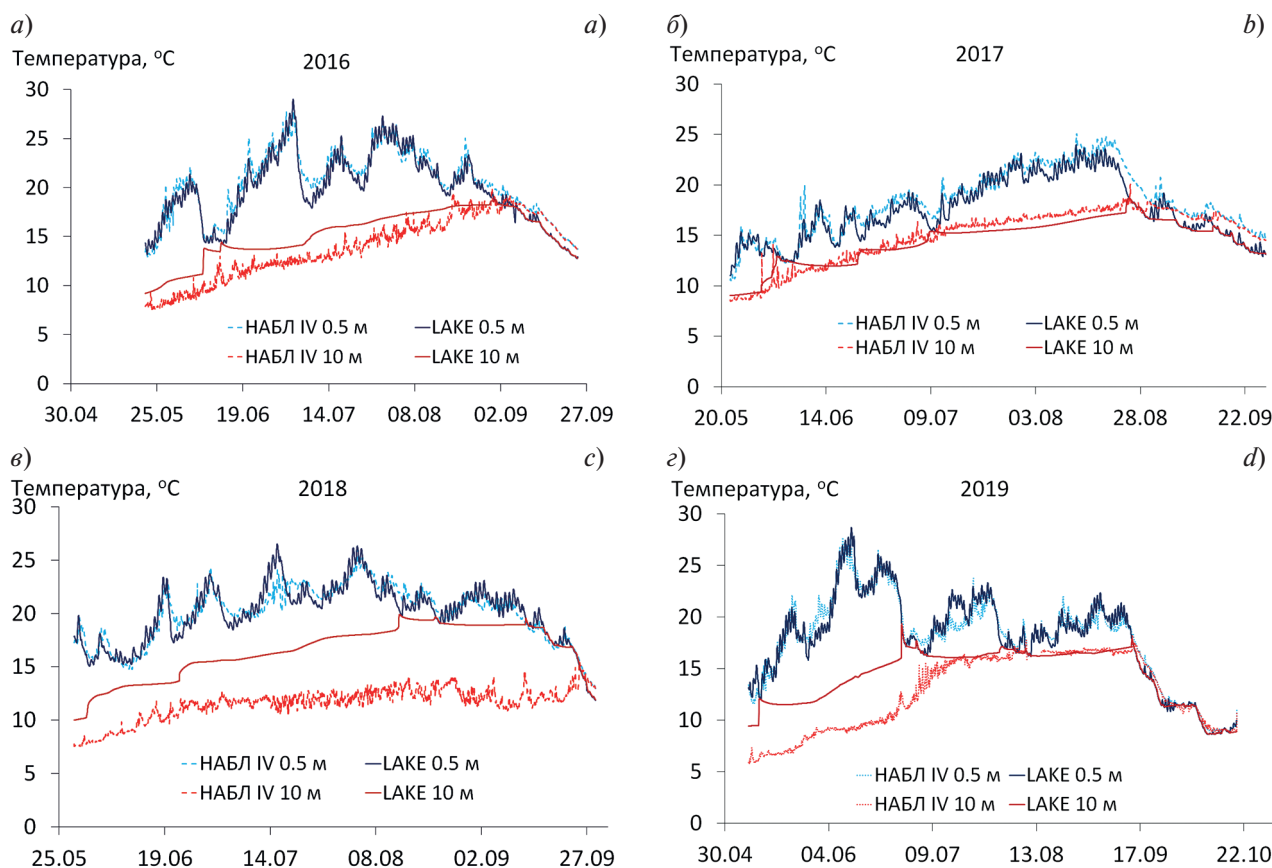


Рис. 4. Сопоставление изменчивости температуры воды в поверхностном горизонте и на глубине 10 м по результатам расчета модели и показаниям термоксы на станции IV за 2016–2019 гг. (a–d соответственно)

Fig. 4. Comparison of surface layer temperature and temperature on 10 m depth between model simulations results and temperature gauges at station IV for 2016–2019 (a–d respectively)

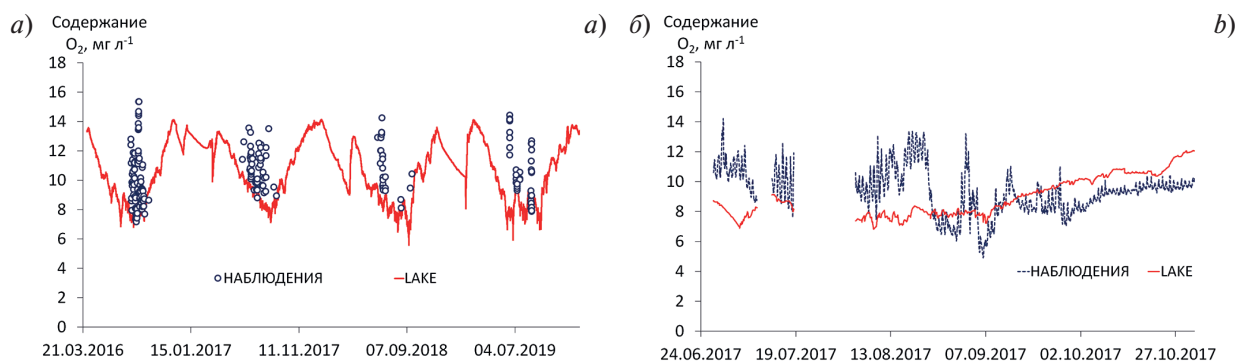


Рис. 5. Сопоставление временной изменчивости концентрации растворенного кислорода в поверхностном горизонте по результатам расчета модели и рейдовым наблюдениям на станции IV (а); показаниям самописцев кислорода в 2017 г. (б)

Fig. 5. Comparison of temporal variability of dissolved oxygen concentrations in surface layer between model simulation results and in situ measurements at station IV (a); between model simulation results and oxygen measurement gauge in 2017 (b)

В летние периоды, когда проводились наблюдения за содержанием растворенного кислорода, в воде концентрации значительно выше, чем рассчитанные по модели (рис. 5). Для расчета концентрации растворенного кислорода в модели LAKE используется адаптированная к одномерной модели суточно-осредненная схема параметризации процессов углеродного цикла Хансона [38], поэтому суточный цикл содержания O_2 в поверхностных горизонтах в модели воспроизводится с заниженной амплитудой. Систематическое занижение концентрации кислорода в перемешанном слое связано с тем, что в модели эта концентрация находится в близком равновесии с атмосферным содержанием. Малые отклонения от равновесного состояния объясняются приближенным равенством источников (фотосинтез) и стоков (разложение отмершей органики) в модельном эпилимнионе (верхнем хорошо перемешиваемом слое). В свою очередь, это может быть вызвано высокой скоростью окисления детрита, который не успевает покинуть перемешанный слой в ходе осаждения. В контексте же данного исследования, наиболее важно то, что для расчета скорости окисления метана в поверхностных горизонтах значительная разница в концентрации O_2 по модели и по наблюдениям не имеет значения, так как при таком насыщении кислорода деятельность метанотрофных микроорганизмов не лимитируется его недостатком (иными словами, и в модели, и в наблюдениях содержание кислорода в перемешанном слое значительно превышает константу полунасыщения, равную 0,33 мг/л, в уравнении Михаэлиса-Ментен).

Для процессов формирования потоков метана важной характеристикой является содержание кислорода в придонных горизонтах воды, особенно при образовании аноксидной зоны в гипolimнионе (придонный слой под температурным и плотностным скачком). При сопоставлении результатов модели и натурных наблюдений по концентрации растворенного кислорода у дна видно, что качество расчёта является удовлетворительным (рис. 6).

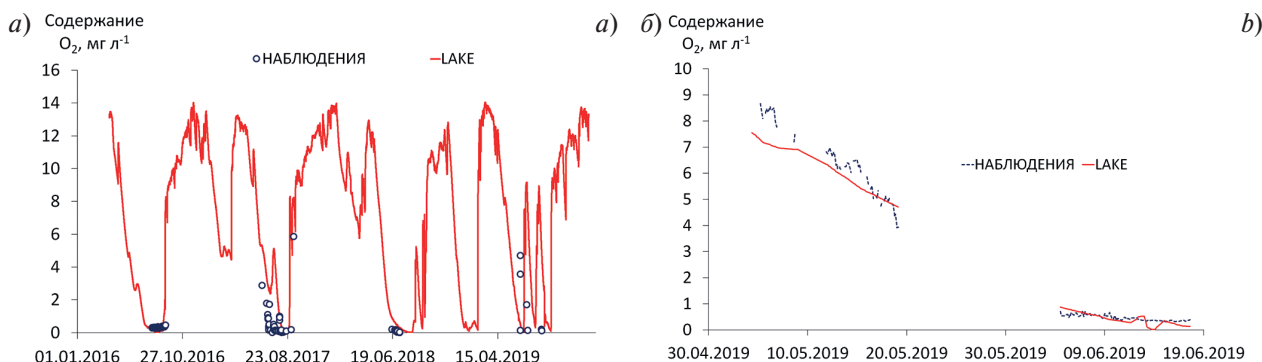


Рис. 6. Сопоставление временной изменчивости концентрации растворенного кислорода в придонном горизонте (около 13 м) по результатам расчета модели и рейдовым наблюдениям на станции IV (а); показаниям самописцев кислорода в 2019 г. (б)

Fig. 6. Comparison of temporal variability of dissolved oxygen concentrations in bottom layer (about 13 m) between model simulation results and in situ measurements at station IV (a); between model simulation results and oxygen measurement gauge in 2019 (b)

Модель хорошо воспроизводит процессы истощения запасов кислорода в придонной воде в течение летнего периода, что очень важно для накопления метана в гипolimнии.

При сравнении концентраций метана в поверхностном слое по модели и по натурным данным выявлено, что модель хорошо воспроизводит временную изменчивость концентрации, однако, завышает эти значения в среднем на 0,2–0,3 мкмоль/л, при этом данная ошибка характерна для всего периода. Сравнение концентрации метана в придонной воде по модели и по рейдовым наблюдениям показало, что в LAKE наблюдается рост концентрации метана у дна летом, как и по натурным наблюдениям, однако, интенсивность его накопления в модели значительно ниже, чем наблюдаемые *in situ* значения (рис. 7, б). При этом, сезонные максимумы концентрации совпадают по времени в модели и по наблюдениям. Для сравнения на рис. 7, б приведена изменчивость концентрации метана не только на глубине 14 м (глубина рейдовой вертикали), но и на нижнем слое модели — 22 м. Даже на самом глубоком горизонте в модели метан в гипolimнии аккумулируется меньше, чем в локальных наблюдениях.

Из графика 7 видно, что модель на данный момент плохо воспроизводит рост концентрации метана в придонных горизонтах. Однако без включения в расчетную схему динамической характеристики, связанной с изменением количества лабильного органического вещества в донных отложениях, получить наблюдаемые высокие концентрации достаточно сложно. В дальнейшем такой блок расчета будет включен в модель LAKE.

По результатам расчета модели был получен временной ход диффузного и пузырькового потоков метана (рис. 8).

Для оценки качества воспроизведения моделью временной изменчивости суммарного потока метана, было проведено сравнение полученных значений потока по многочисленным рейдовым наблюдениям на станции IV и суммы значений пузырькового потока со второй по глубине грунтовой колонки в модели (рис. 3) (так как она наиболее соответствует глубинам рейдовой вертикали) и среднего по поверхности водоёма диффузного потока (рис. 9).

Основная задача применения модели — это оценка годовой эмиссии, что предполагает качественное воспроизведение сезонно-осреднённых значений эмиссии, а также значительных выбросов метана, происходящих из-за перемешивания водной толщи при разрушении стратификации или перепадов гидростатического давления. Модель удовлетворительно воспроизводит как фоновые значения потока метана в летний период, так и разовые большие выбросы, что хорошо видно на примере 2018 и 2019 гг. — пики значений потока по наблюдениям соответствуют пикам по модели, однако, смещены по времени на 1–2 сут. Расчёт по модели менее успешен летом 2017 г. Поток метана в течение лета значительно увеличивался из-за накопления в грунтах свежего органического вещества. При этом в модели изменение генерации

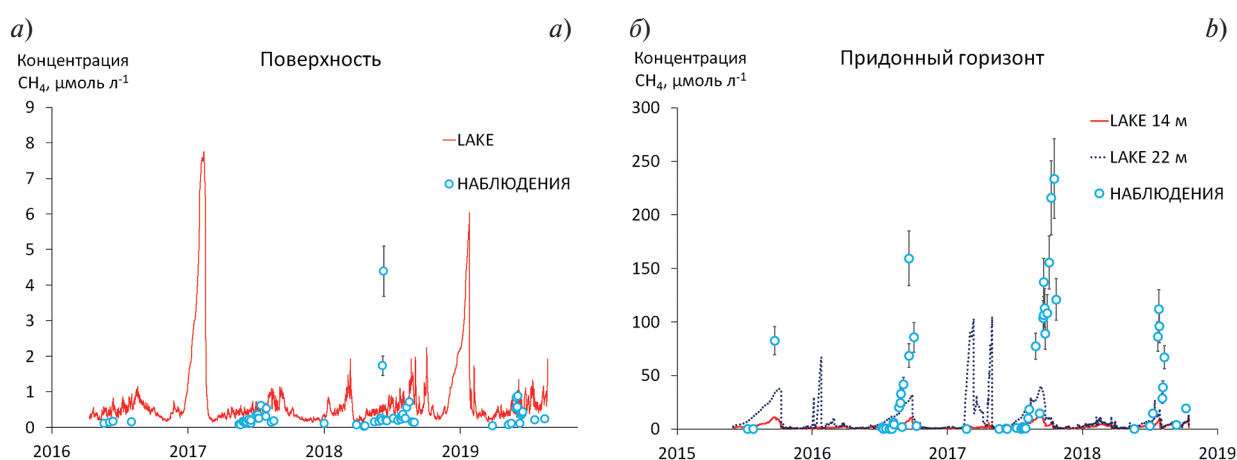


Рис. 7. Сопоставление изменчивости концентрации метана в воде в поверхностном горизонте (а) и на горизонтах 14 и 22 м (б) по результатам расчета модели и рейдовым наблюдениям на станции IV. Для наблюдений приведены значения с интервалами, соответствующими относительной ошибке определения концентрации метана 16 %

Fig. 7. Comparison of variability of methane concentrations in surface layer (a) and on depth 14 and 22 m (b) between model simulation results and *in situ* measurements at station IV. For *in situ* measurements intervals of relative errors (16 % for methane concentration) are shown

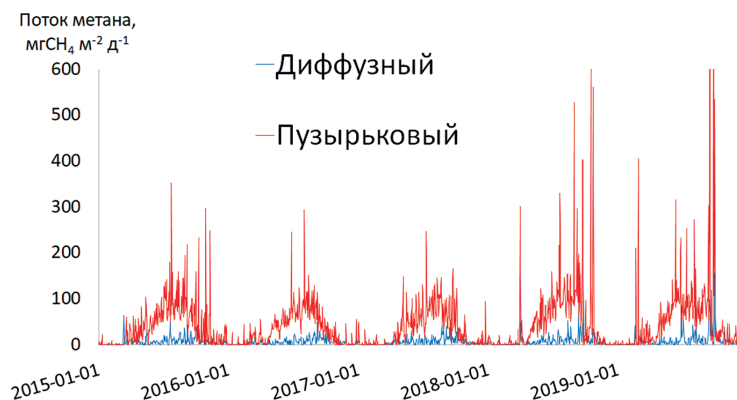


Рис. 8. Временная изменчивость двух основных составляющих потока метана (диффузного и пузырькового) в атмосферу за 2015–2019 гг. по результатам модели

Fig. 8. Temporal variability of two main components of methane flux (diffusive and ebullition) into the atmosphere in 2015–2019 by model simulation results

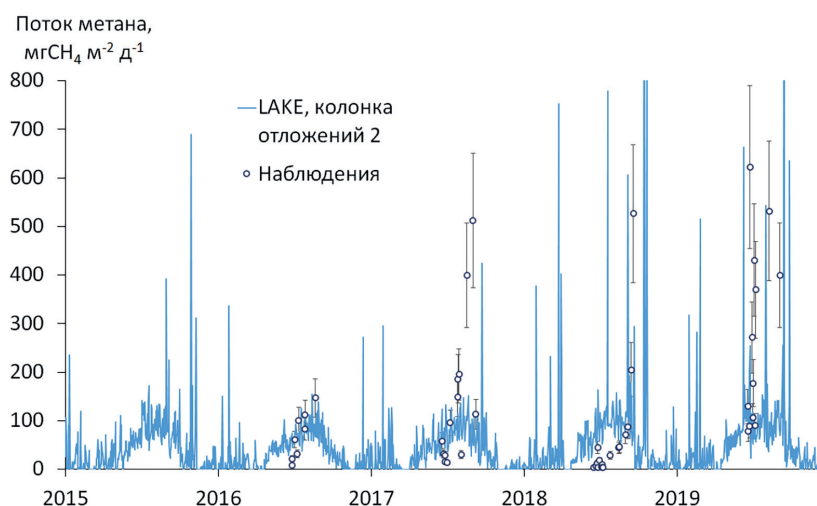


Рис. 9. Сопоставление значений общего потока метана за 2015–2019 гг. по расчету модели LAKE (вторая колонка) и по наблюдениям на рейдовой вертикали на Можайском водохранилище (станция IV). Для наблюдений приведены значения с интервалами, соответствующими относительной ошибке определения потока метана в атмосферу 27 %

Fig. 9. Comparison of total methane flux in 2015–2019 between LAKE model (column 2) and *in situ* measurements at station IV in Mozhaysk Reservoir. For *in situ* measurements intervals of relative errors (27 % for methane fluxes) are shown

метана в донных отложениях зависит только от температуры, изменение содержания органического вещества в донных отложениях не предусмотрено, и в 2017 г. этот фактор оказал наиболее значительное влияние на результаты расчетов. В дальнейшем планируется усовершенствовать модель в этой части, добавив переменное содержание органического вещества в донных отложениях и заменить константу генерации метана [9] на переменную, зависящую от содержания лабильного ОВ в грунтах.

Примечательно, что пересыщение кислородом в эпилимнионе может быть «предиктором» для резкого летнего роста эмиссии метана, т. к. это пересыщение свидетельствует о значительной первичной продукции и быстром удалении отмершей органики из перемешанного слоя, так что последняя, осаждаясь на дне, становится субстратом для метаногенов.

По данным основного расчета модели (рис. 8) была оценена эмиссия метана с Можайского водохранилища за 2015–2019 г. В табл. 2 представлены результаты оценки эмиссии с помощью модели LAKE и по натурным наблюдениям.

Значения, полученные двумя способами, достаточно близки, и средний поток метана из Можайского водохранилища за весь расчетный период составляет $34,4 \text{ мгС-CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$ по натурным наблюдениям и $37,7 \text{ мгС-CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$ по модели. Эти значения при сравнении с мировыми оценками относят Можайское водохранилище к верхней границе диапазона значений для водоемов умеренного пояса [7]. Однако, на данный момент описанные методы оценки имеют расхождения при сравнении отдельных лет между собой. Дальнейшее исследование этого вопроса позволит получить еще более точные оценки и применять метод моделирования для оценки эмиссии метана с менее изученных и неизученных водохранилищ, а также при различных сценариях будущего изменения климата.

Как и по данным натурных наблюдений, основной вклад в эмиссию метана по результатам моделирования составляет пузырьковая составляющая, которая особенно существенна при значительном общем потоке (рис. 8). Хорошо видна тенденция увеличения потока с весеннего периода к концу лета/началу осени со значительным выбросом перед фазой осенней конвекции, что также согласуется с натурными данными. В модели увеличение потока за теплый период связано в первую очередь с увеличением придонной температуры воды и донных отложений, в предположении, что продукция метана определяется интенсивностью микробиологических процессов, напрямую зависящих от температурного режима.

Помимо значительно большего вклада в общую эмиссию, пузырьковый поток имеет намного более значительную амплитуду колебаний в течение всего года, в сравнении с другими видами потока. Связано это с чувствительностью пузырькового потока в модели к динамике гидростатического давления, которое представляется собой сумму атмосферного давления и веса столба воды. Это хорошо видно по результатам численного эксперимента, в котором во входных данных атмосферное давление задавалось константой = 993 гПа — среднее значение атмосферного давления за расчетный период (рис. 10, б).

Таблица 2

Table 2

Оценка эмиссия метана из Можайского водохранилища по результатам расчета модели LAKE и по натурным данным

Methane emission estimation from Mozhaysk Reservoir by LAKE model simulations and by *in situ* observations

| Год | Эмиссия, тС по модели LAKE | Эмиссия, тС по натурным данным |
|------|----------------------------|--------------------------------|
| 2015 | 338 | |
| 2016 | 315 | |
| 2017 | 325 | 347 |
| 2018 | 414 | 265 |
| 2019 | 415 | 389 |

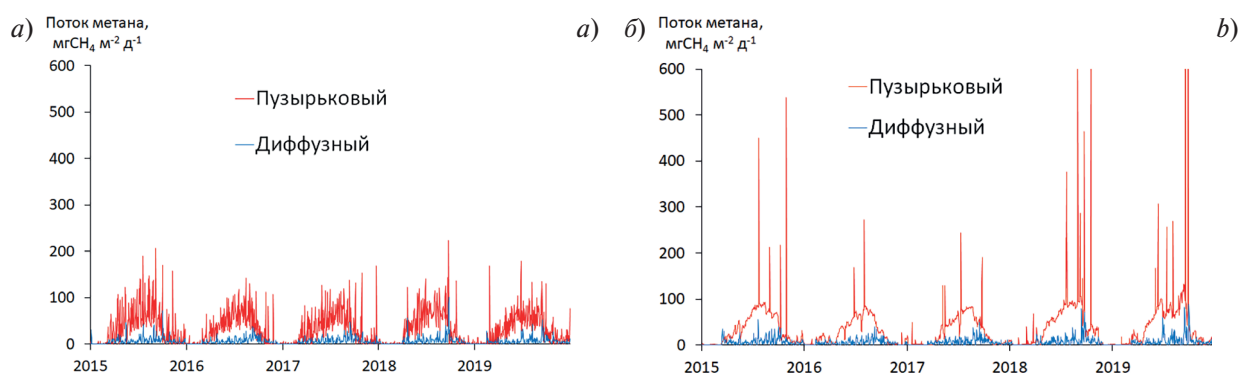


Рис. 10. Временная изменчивость потока метана в атмосферу с Можайского водохранилища с 2015 по 2019 г. по результатам моделирования при постоянном уровне воды (а), при задании атмосферного давления постоянным значением = 993 гПа (б)

Fig. 10. Temporal variability of methane flux into the atmosphere from Mozhaysk Reservoir in 2015–2019 by model simulations with constant water level (a), with constant atmospheric pressure = 993 hPa (b)

При таких условиях амплитуда колебаний пузырькового потока сильно уменьшилась, и во временном ходе остались только крупные выбросы, связанные с понижением уровня воды, а также постепенный рост потока в течение теплого периода, за счет повышения температуры донных отложений. Возникновение наиболее крупных выбросов метана в атмосферу по причине резких изменений уровня подтверждается экспериментом с моделью, в котором задавался постоянный уровень и водный баланс не учитывался (рис. 10, а). Также были отключены приток и сток тепла с речными водами, приток метана, кислорода и других физических и химических характеристик воды.

В результатах данного расчета максимальных выбросов, достигающих в основном эксперименте 500–600 мг $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, не наблюдается. Стоит отметить, что диффузный поток метана в атмосферу в обоих экспериментах практически не изменился. В табл. 3 приведены значения годовой эмиссии метана по результатам приведенных расчетов.

Были проведены эксперименты по оценке чувствительности модели к изменению максимальной потенциальной скорости реакции окисления метана для более точного воспроизведения его поверхностной концентрации, что важно для корректного воспроизведения диффузного потока в атмосферу (рис. 11, а). Результаты расчета модели, в котором максимальная потенциальная скорость реакции была увеличена в два раза с 0,1 моль/сут до 0,2 моль/сут, показали, что этот параметр является эффективным калибровочным параметром для приближения концентрации растворенного метана в эпилимнионе к наблюдаемым значениям.

Важным параметром, регулирующим значения пузырькового потока в модели через степень перенасыщения метана в донных отложениях — это параметр температурной зависимости генерации метана q_{10} , принимаемый обычно равным 2 [47]. В основном расчёте модели применялось значение данного параметра, равное 2.1, в дополнительном эксперименте он был принят за 3, что также соответствует используемым в литературе данным [47] (рис. 11, б).

Таблица 3
Table 3

Эмиссия метана с Можайского водохранилища по результатам экспериментов с давлением и уровнем воды
Methane emission from Mozhaysk Reservoir by results of the experiments with pressure and water level

| Год | Эмиссия, тС давление = 993 ГПа | Эмиссия, тС постоянный уровень |
|------|--------------------------------|--------------------------------|
| 2015 | 355 | 341 |
| 2016 | 275 | 297 |
| 2017 | 288 | 309 |
| 2018 | 410 | 312 |
| 2019 | 459 | 305 |

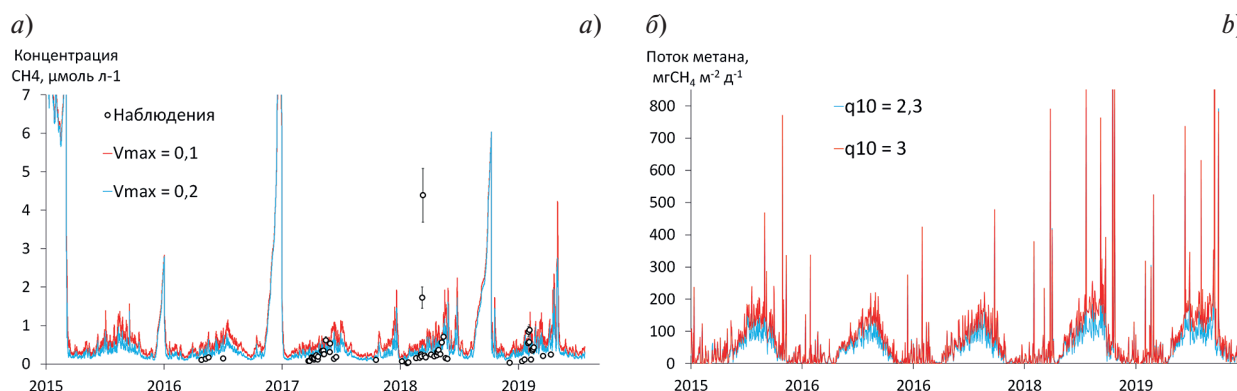


Рис. 11. Результаты численного эксперимента с моделью при увеличении максимальной потенциальной скорости реакции окисления метана в два раза (с 0,1 моль/сут до 0,2 моль/сут) (а) и с различными значениями параметра температурной зависимости генерации метана в грунтах q_{10} ; 1 — $q_{10} = 2,1$; 2 — $q_{10} = 3$ (б)

Fig. 11. Results of numerical experiment with the model with doubled potential rate of methane oxidation reaction (from 0.1 mol per day to 0.2 mol per day) (a) and with different values of methane generation parameter q_{10} ; 1 — $q_{10} = 2.1$; 2 — $q_{10} = 3$ (b)

Таблица 4

Table 4

**Эмиссия метана с Можайского водохранилища по результатам экспериментов
 с изменением потенциальной скорости окисления метана и параметра генерации метана q_{10}**
**Methane emission from Mozhaysk Reservoir by the experiments results with various potential oxidation rate
 and methane generation parameter q_{10}**

| Год | Эмиссия, тС $V_{\max} = 0,2$ | Эмиссия, тС $q_{10} = 3$ |
|------|------------------------------|--------------------------|
| 2015 | 318 | 443 |
| 2016 | 296 | 447 |
| 2017 | 306 | 430 |
| 2018 | 394 | 555 |
| 2019 | 393 | 528 |

Так как основной вклад в общую эмиссию метана вносит именно пузырьковый поток, при увеличении данного параметра значительно изменяется и общая эмиссия метана в атмосферу. Таким образом, оптимизация модели по параметру q_{10} позволяет эффективно корректировать пузырьковый и общий поток метана в атмосферу при наличии данных измерений. Результаты расчета годовых эмиссий метана из Можайского водохранилища по результатам этих экспериментов приведены в табл. 4.

4. Заключение

Сравнение результатов модели с данными наблюдений показало, что модель относительно хорошо воспроизводит температурный режим водохранилища. Температура придонных горизонтов воды воспроизводится несколько хуже, чем температура эпилимниона, что связано со сложностью параметризации вертикального переноса тепла в одномерной модели при устойчивой стратификации. Содержание растворенного кислорода в придонных горизонтах (очень важной характеристики при расчете накопления метана в гипolimнионе) по результатам моделирования очень близко к данным, полученным инструментально.

Оценки суммарной годовой эмиссии метана с Можайского водохранилища по натурным данным и по расчетам модели LAKE близки. Средний поток за период моделирования составил $34,4 \text{ мгС—CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$ по натурным наблюдениям и $37,7 \text{ мгС—CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$ по модели. Такая сходимость результатов достигнута калибровкой параметров: максимальная потенциальная скорость реакции окисления метана (эффективный способ регулирования диффузного потока) и параметр генерации метана q_{10} (эффективный способ регулирования пузырькового потока). Наибольший вклад в общий поток метана вносит пузырьковая составляющая, в летний период пузырьковый поток достигает 95 % от общего потока.

Применённый в настоящей работе подход при дальнейшем совершенствовании модели LAKE, позволит использовать её на других водных объектах, основываясь на тех ключевых параметрах, которые были выявлены в ходе численного воспроизведения потоков на Можайском водохранилище. На менее изученных водных объектах будет возможно акцентировать внимание в исследовании именно на наиболее важные для точного воспроизведения потоков метана аспекты. Проведенные численные эксперименты позволяют определить основные параметры модели, необходимые для реалистичного воспроизведения потоков метана на границе «вода — атмосфера» и корректной оценки годовой эмиссии с искусственных водоемов.

Финансирование

Настоящая работа частично поддержана Министерством высшего образования и науки России (договор № 075–15–2019–1621) и Совета по грантам Президента Российской Федерации (договор № МД–1850.2020.5).

Funding

This work was partially supported by the Ministry of Higher Education and Science of Russia (agreement No. 075–15–2019–1621) and the Grants Council of the President of the Russian Federation (agreement No. MD-1850.2020.5).

Литература

1. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T. et. al. Changes in atmospheric constituents and in Radiative Forcing // *Asses. Report of the IPCC*. 2007. Chapter 2. P. 129–217.
2. IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: <https://www.ipcc.ch> (дата обращения: 01.12.2021).
3. Sanuoi M. et. al. The global methane budget 2000–2012 // *Earth System Science Data*. 2016. Vol. 8. P. 697–751. doi:10.5194/essd-8-697-2016
4. Deemer B. et.al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis // *BioScience*. 2016. Vol. 66, N 11. P. 949–964. doi:10.1093/biosci/biw117
5. Li S., Zhang Q. Carbon emission from global hydroelectric reservoirs revisited // *Environmental Science and Pollution Research*. 2014. Vol. 21. P. 13636–13641. doi:10.1007/s11356-014-3165-4
6. Louis V. et.al. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate // *BioScience*. 2000. Vol. 50. P. 766–775. doi:10.1641/0006-3568(2000)050[0766:RSASOG]2.0.CO;2
7. Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. Impact of large dams: A global assessment. Berlin: Springer, 2012. 410 p.
8. Tremblay A., Roehm C., Varfalvy L., Garneau M. Greenhouse gas emissions — fluxes and processes. Berlin: Springer, 2005. 732 p.
9. Stepanenko V. et. al. LAKE2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // *Geoscientific Model Development*. 2016. Vol. 9, N 5. P. 1977–2006. doi:10.5194/gmd-9-1977-2016
10. Stepanenko V., Valerio G., Pilotti M. Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models // *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*. 2020. Vol. 12. P.e21063. doi:10.1029/2019MS001906
11. Stepanenko V., Machul'skaya E., Glagolev M., Lykosov V. Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone // *Izvestiya — Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. Vol. 47, N 2. P. 252–264. doi:10.1134/S0001433811020113
12. Tan Z., Zhuang Q., Anthony K. Modeling methane emissions from arctic lakes: Model development and site-level study // *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*. 2015. Vol. 7. P. 459–483. doi:10.1002/2014MS000344
13. Tan Z., Zhuang Q. Arctic lakes are continuous methane sources to the atmosphere under warming conditions // *Environmental Research Letters*. 2015. Vol. 10, N5. P. 054016. doi:10.1088/1748-9326/10/5/054016
14. Guseva S., Stepanenko V., Shurpali N., Marushchak M. et. al. Numerical simulation of methane emission from subarctic lake in Komi republic (Russia) // *Geography, Environment, Sustainability*. 2016, 2, 9, 58–74. doi:10.24057/2071-9388-2016-9-2-11-20
15. Tan Z., Zhuang Q., Shurpali N., Marushchak M. et. al. Modeling CO₂ emissions from Arctic lakes: Model development and site-level study // *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*. 2017. Vol. 9, N 5. P. 2190–2213. doi: org/10.1002/2017MS001028
16. Kiuru P., Ojala A., Mammarella I., Heiskanen J. et. al. Effects of climate change on CO₂ concentration and efflux in a humic boreal lake: A modeling study // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2018. Vol. 123, N 7. P. 2212–2233. doi:10.1029/2018JG004585
17. Guseva S., Bleninger T., Jöhnk K., Polli B. et. al. Multimodel simulation of vertical gas transfer in a temperate lake // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2020. Vol. 24. P. 697–715. doi:10.5194/hess-24-697-2020
18. 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 Pollution*. 2015. Vol. 226. P. 16–32. doi:10.1007/s11270-014-2268-3
19. Bazhin N. Methane emission from bottom sediments // *Chemistry for Sustainable Development*. 2003. Vol. 11. P. 577–580.
20. Gash J. (main edit.) Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs // *World Bank Report*. 2010. UNESCO/IHA GHG Proj. P. 166.
21. Borrel G., Jezequel D., Bidderre-Petit C., Morel-Desrosiers N. et. al. Production and consumption of methane in freshwater lake ecosystems // *Research Microbiology*. 2011. Vol. 162. P. 832–847. doi:10.1016/j.resmic.2011.06.004
22. Guerin F., Abril G. Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2007. Vol. 112. P. 3006–3020. doi:10.1029/2006JG000393
23. Bastviken D., Cole J., Pace M., Van de Bogert M. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2008. Vol. 113. P. 2024–2037. doi:10.1029/2007JG000608
24. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 6. С. 48–58.

25. 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 // *Limnology and Oceanography: Methods*. 2008. Vol. 6. P. 105–118. doi:10.4319/lom.2008.6.105
26. Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O'Malley M. Reservoir water-level drawdowns accelerate and amplify methane emission // *Environmental Science & Technology*. 2017. Vol. 51, N3. P. 1267–1277. doi:10.1021/acs.est.6b03185
27. Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M. Methane ebullition in temperate hydropower reservoirs and implications for US policy on greenhouse gas emissions // *Environmental Management*. 2017. Vol. 60. P. 1–15. doi:10.1007/s00267-017-0909-1
28. Beaulieu J., DelSontro T., Downing J. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century // *Nature Communications*. 2019. Vol. 10. P. 1375–1380. doi:10.1038/s41467-019-09100-5
29. Bartosiewicz M., Pytulska A., Laurion I., Maranger R. Effects of phytoplankton blooms on fluxes and emissions of greenhouse gases in a eutrophic lake // *Water Research*. 2021. Vol. 196. P. 116985. doi:10.1016/j.watres.2021.116985
30. Kemenes A., Melack J., Forsberg B. Downstream emissions of CH₄ and CO₂ from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin // *Inland Waters*. 2016. Vol. 6. P. 295–302. doi:10.1080/IW-6.3.980
31. Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ. Учебник для вузов. М.: Перо, 2014. 399 с.
32. Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // *Environmental Science & Technology*. 2010. Vol. 44. P. 5450–5455. doi:10.1021/es1005048
33. Iakunin M., et. al. Numerical study of the seasonal thermal and gas regimes of the largest artificial reservoir in western Europe using the LAKE2.0 model // *Geoscientific Model Development*. 2020. Vol. 13, N 8. P. 3475–3488. doi:10.5194/gmd-13-3475-2020
34. Businger J., Wyngaard J., Izumi Y., Bradley E. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1971. Vol. 28, N 2. P. 181–189.
35. Paulson C. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer // *Journal of Applied Meteorology*. 1970. Vol. 9, N 6. P. 857–861.
36. McGinnis D., et. al. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006. Vol. 111, N C9. doi:10.1029/2005JC003183
37. Stefan H., Fang X. Dissolved oxygen model for regional lake analysis // *Ecological Modelling*. 1994. Vol. 71, N 1–3. P. 37–68.
38. Hanson P. et. al. A model of carbon evasion and sedimentation in temperate lakes // *Global Change Biology*. 2004. Vol. 10, N 8. P. 1285–1298. doi:10.1111/j.1529-8817.2003.00805.x
39. Sadeghian A. et. al. Improving in-lake water quality modeling using variable chlorophyll a/algal biomass ratios // *Environmental Modelling & Software*. 2018. Vol. 101. P. 73–85. doi:10.1016/j.envsoft.2017.12.009
40. Fichot C., Miller W. An approach to quantify depth-resolved marine photochemical fluxes using remote sensing: Application to carbon monoxide (CO) photoproduction // *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114, N 7. P. 1363–1377. doi:10.1016/j.rse.2010.01.019
41. Koehler B. et. al. Sunlight-induced carbon dioxide emissions from inland waters // *Global Biogeochemical Cycles*. 2014. Vol. 28, N 7. P. 696–711. doi:10.1002/2014GB004850
42. Walker R., Snodgrass W. Model for sediment oxygen demand in lakes // *Journal of Environmental Engineering*. 1986. Vol. 112, N 1. P. 25–43. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(1986)112:1(25)
43. Donelan M., Wanninkhof R. Gas transfer at water surfaces — concepts and issues // *Geophysical Monograph Series*. 2002. Vol. 127. P. 1–10. doi:10.1029/GM127p0001
44. Степаненко В.М., Репина И.А., Ганбат Г., Даваа Г. Моделирование ледового режима соленых озер // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 1. С. 152–163. doi:10.31857/S0002-3515551152-163
45. Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M., Repina I. Methane fluxes in an artificial valley reservoir according to field observations and mathematical modeling // *IOP Conf. Ser.: Earth Environmental Science*. 2020. Vol. 611. P. 12–29. doi:10.1088/1755-1315/611/1/012029
46. Lomov V., Grechushnikova M., Kazantsev V., Repina I. Reasons and patterns of spatio-temporal variability of methane emission from the mozhaysk reservoir in summer period // *E3S Web of Conferences IV Vinogradov Conference*. 2020. Vol. 163. P. 03010. doi:10.1051/e3sconf/202016303010
47. Liikanen A., Murtoniemi T., Tanskanen H., Tero V. et. al. Effects of temperature and oxygen availability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of a eutrophic mid-boreal lake // *Biogeochemistry*. 2002. Vol. 59, N 3. P. 269–286. doi:10.1023/A%3A1016015526712

References

1. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Bernsten T. et. al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. *Asses. Report of the IPCC*. 2007, Chapter 2, 129–217.
2. IPCC. The intergovernmental panel on climate change. URL: <https://www.ipcc.ch> (date of access: 01.12.2021).
3. Sanuoi M., Biusquet P., Poulter B., Peregon A. et. al. The global methane budget 2000–2012. *Earth System Science Data*. 2016, 8, 697–751. doi:10.5194/essd-8-697-2016
4. Deemer B., Harrison A., Li S., Beaulieu J. et. al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. *BioScience*. 2016, 66, 11, 949–964. doi:10.1093/biosci/biw117
5. Li S., Zhang Q. Carbon emission from global hydroelectric reservoirs revisited. *Environmental Science and Pollution Research*. 2014, 21, 13636–13641. doi:10.1007/s11356-014-3165-4
6. Louis V., Kelly C., Duchemin E., Rudd J. et. al. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate. *BioScience*. 2000, 50, 766–775. doi:10.1641/0006-3568(2000)050[0766: RSASOG]2.0.CO;2
7. Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. Impact of large dams: A global assessment. *Berlin, Springer*, 2012. 410 p.
8. Tremblay A., Roehm C., Varfalvy L., Garneau M. Greenhouse gas emissions — fluxes and processes. *Berlin, Springer*. 2005. 732 p.
9. Stepanenko V. et.al. LAKE2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. *Geoscientific Model Development*. 2016, 9, 5, 1977–2006. doi:10.5194/gmd-9-1977-2016
10. Stepanenko V., Valerio G., Pilotti M. Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*. 2020, 12, e21063. doi:10.1029/2019MS001906
11. Stepanenko V., Machul'skaya E., Glagolev M., Lykosov V. Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone. *Izvestiya — Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011, 47, 2, 252–264. doi:10.1134/S0001433811020113
12. Tan Z., Zhuang Q., Anthony K. Modeling methane emissions from arctic lakes: Model development and site-level study. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*. 2015, 7, 459–483. doi:10.1002/2014MS000344
13. Tan Z., Zhuang Q. Arctic lakes are continuous methane sources to the atmosphere under warming conditions. *Environmental Research Letters*. 2015, 10, 5, 054016. doi:10.1088/1748-9326/10/5/054016
14. Guseva S., Stepanenko V., Shurpali N., Marushchak M. et.al. Numerical simulation of methane emission from subarctic lake in Komi republic (Russia). *Geography, Environment, Sustainability*. 2016, 2, 9, 58–74. doi:10.24057/2071-9388-2016-9-2-11-20
15. Tan Z., Zhuang Q., Shurpali N., Marushchak M. et. al. Modeling CO₂ emissions from Arctic lakes: Model development and site-level study. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*. 2017, 9, 5, 2190–2213. doi:10.1002/2017MS001028
16. Kiuru P., Ojala A., Mammarella I., Heiskanen J. et. al. Effects of climate change on CO₂ concentration and efflux in a humic boreal lake: A modeling study. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2018, 123, 7, 2212–2233. doi:10.1029/2018JG004585
17. Guseva S., Bleninger T., Jöhnk K., Polli B. et. al. Multimodel simulation of vertical gas transfer in a temperate lake. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2020, 24, 697–715. doi:10.5194/hess-24-697-2020
18. 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 Pollution*. 2015, 226, 16–32. doi:10.1007/s11270-014-2268-3
19. Bazhin N. Methane emission from bottom sediments. *Chemistry for Sustainable Development*. 2003, 11, 577–580.
20. Gash J. (main edit.) Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs. *World Bank Report*. 2010, UNESCO/IHA GHG Proj. P. 166.
21. Borrel G., Jezequel D., Bidderre-Petit C., Morel-Desrosiers N. et. al. Production and consumption of methane in freshwater lake ecosystems. *Research Microbiology*. 2011, 162, 832–847. doi:10.1016/j.resmic.2011.06.004
22. Guerin F., Abril G. Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2007, 112, 3006–3020. doi:10.1029/2006JG000393
23. Bastviken D., Cole J., Pace M., Van de Bogert M. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2008, 113, 2024–2037. doi:10.1029/2007JG000608
24. Garkusha D., Fedorova A., Tambieva N. Computing the methane cycle elements in the Aquatic ecosystems of the Sea of Azov and the World Ocean based on empirical formulae. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016, 41, 6, 410–417. doi:10.3103/S1068373916060054
25. 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. *Limnology and Oceanography: Methods*. 2008, 6, 105–118. doi:10.4319/lom.2008.6.105

26. Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O'Malley M. Reservoir water-level drawdowns accelerate and amplify methane emission. *Environmental Science & Technology*. 2017, 51, 3, 1267–1277. doi:10.1021/acs.est.6b03185
27. Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M. Methane ebullition in temperate hydropower reservoirs and implications for US policy on greenhouse gas emissions. *Environmental Management*. 2017, 60, 1–15. doi:10.1007/s00267-017-0909-1
28. Beaulieu J., DelSontro T., Downing J. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. *Nature Communications*. 2019, 10, 1375–1380. doi:10.1038/s41467-019-09100-5
29. Bartosiewicz M., Pytulska A., Laurion I., Maranger R. Effects of phytoplankton blooms on fluxes and emissions of greenhouse gases in a eutrophic lake. *Water Research*. 2021, 196, doi:10.1016/j.watres.2021.116985
30. Kemenes A., Melack J., Forsberg B. Downstream emissions of CH₄ and CO₂ from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin. *Inland Waters*. 2016, 6, 295–302. doi:10.1080/IW-6.3.980
31. Edelshtein K. Hydrology of lakes and reservoirs. M., “Pero” publishing, 2014. 399 p. (in Russian).
32. Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. *Environmental Science & Technology*. 2010, 44, 5450–5455. doi:10.1021/es1005048
33. Iakunin M., Stepanenko V., Salgado R., Potes M. et. al. Numerical study of the seasonal thermal and gas regimes of the largest artificial reservoir in western Europe using the LAKE2.0 model. *Geoscientific Model Development*. 2020, 13, 8, 3475–3488. doi.org/10.5194/gmd-13-3475-2020
34. Businger J., Wyngaard J., Izumi Y., Bradley E. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1971, 28, 2, 181–189.
35. Paulson C. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology*. 1970, 9, 6, 857–861.
36. McGinnis D., Greinert J., Artemov Y., Beaubien E., et.al. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006, 111, C9. doi.org/10.1029/2005JC003183
37. Stefan H., Fang X. Dissolved oxygen model for regional lake analysis. *Ecological Modelling*. 1994, 71, 1–3, 37–68.
38. Hanson P., Pollard A., Bade D., Predick K. et. al. A model of carbon evasion and sedimentation in temperate lakes. *Global Change Biology*. 2004, 10, 8, 1285–1298. doi:10.1111/j.1529-8817.2003.00805.x
39. Sadeghian A., Chapra S., Hudson J., Wheeler H. et. al. Improving in-lake water quality modeling using variable chlorophyll a/algal biomass ratios. *Environmental Modelling & Software*. 2018, 101, 73–85. doi:10.1016/j.envsoft.2017.12.009
40. Fichot C., Miller W. An approach to quantify depth-resolved marine photochemical fluxes using remote sensing: Application to carbon monoxide (CO) photoproduction. *Remote Sensing of Environment*. 2010, 114, 7, 1363–1377. doi:10.1016/j.rse.2010.01.019
41. Koehler B., Landelius T., Weyhenmeyer G., Machida N. et. al. Sunlight-induced carbon dioxide emissions from inland waters. *Global Biogeochemical Cycles*. 2014, 28, 7, 696–711. doi:10.1002/2014GB004850
42. Walker R., Snodgrass W. Model for sediment oxygen demand in lakes. *Journal of Environmental Engineering*. 1986, 112, 1, 25–43. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(1986)112:1(25)
43. Donelan M., Wanninkhof R. Gas transfer at water surfaces — concepts and issues. *Geophysical Monograph Series*. 2002, 127, 1–10. doi:10.1029/GM127p0001
44. Stepanenko V., Repina I., Ganbat G., Davaa G. Numerical simulation of ice cover of saline lakes. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019, 55, 1, 129–138. doi:10.1134/S0001433819010092
45. Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M., Repina I. Methane fluxes in an artificial valley reservoir according to field observations and mathematical modeling. *IOP Conf. Ser.: Earth Environmental Science*. 2020, 611, 12–29. doi:10.1088/1755-1315/611/1/012029
46. Lomov V., Grechushnikova M., Kazantsev V., Repina I. Reasons and patterns of spatio-temporal variability of methane emission from the Mozhaysk Reservoir in summer period. *E3S Web of Conferences IV Vinogradov Conference*. 2020, 163, 03010. doi:10.1051/e3sconf/202016303010
47. Liikanen A., Murtoniemi T., Tanskanen H., Tero V. et. al. Effects of temperature and oxygen availability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of a eutrophic mid-boreal lake. *Biogeochemistry*. 2002, 59, 3, 269–286. doi:10.1023/A%3A1016015526712

Об авторах

СТЕПАНЕНКО Виктор Михайлович, РИНЦ AuthorID: 128281, Scopus AuthorID: 12808698000,
e-mail: stepanen@srcc.msu.ru

ЛОМОВ Виктор Александрович, РИНЦ AuthorID: 1067937, Scopus AuthorID: 57211208174,
e-mail: lomson620@mail.ru

ГРЕЧУШНИКОВА Мария Георгиевна, РИНЦ AuthorID: 68381, Scopus AuthorID: 6507726807