

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩА

В.М.Степаненко^{1,2}, М.Г.Гречушникова^{2,4}, И.А.Репина^{3,1}*

1. Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр. Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.4, nivc@srcc.msu.ru
2. Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет. Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.1, info@geogr.msu.ru
3. Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН. Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., д.3, ifaran@ifaran.ru
4. Институт водных проблем РАН. Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д.3, info@iwp.ru

Е-mail: stepanen@srcc.msu.ru

Реферат

В контексте Парижского соглашения новое звучание приобретает задача инвентаризации эмиссий парниковых газов различными секторами экономики. Искусственно затопленные территории хорошо известны как источники CO₂, CH₄ и N₂O для атмосферы, при этом существующие методы инвентаризации для подобного рода объектов не учитывают явно многие важные физические и биогеохимические механизмы, ответственные за формирование этих эмиссий. Новая версия одномерной по вертикали физико-биогеохимической модели LAKE (версия 2.3) адаптирована для проточных водоёмов, т.е. учитывает источники/стоки всех прогностических переменных за счёт притоков и вытекающих водотоков, а также среднюю вертикальную скорость и колебания уровня. С помощью модели проведён расчёт одного годового цикла (2016-2017 гг.) термодинамического и гидрохимического состояния Можайского водохранилища, в котором в граничных условиях использовались данные приземных измерений метеорологических величин. Модель демонстрирует удовлетворительное согласие с данными наблюдений об осреднённом по горизонтали вертикальном распределении температуры воды, содержания растворённого кислорода и метана летом 2017 г. При этом, в данных измерений отмечается существенная горизонтальная неоднородность, особенно в концентрации метана. Параметризация эффектов горизонтальной неоднородности – важная

задача для будущего развития модели. По результатам моделирования, в период с августа 2016 г. по август 2017 г. суммарный поток метана из водохранилища в атмосферу составил 570 Мг/год, из них 80% приходится на пузырьковый поток с поверхности водного объекта, 15% - на диффузионный поток с поверхности, и 5% метана покидает водохранилище через дамбу. Таким образом, предложенная модель может быть рассмотрена как инструмент для инвентаризации эмиссии парниковых газов из искусственных водных объектов.

Ключевые слова

водохранилища, метан, инвентаризация, численное моделирование

NUMERICAL SIMULATION OF METHANE EMISSION FROM AN ARTIFICIAL RESERVOIR

V.M.Stepanenko^{1,2}, M.G.Grechushnikova^{2,4}, I.A.Repina^{3,1}*

1. Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center. 119234, Leninskie Gory str., 1, bld.4, Moscow, Russia, nivc@srcc.msu.ru
2. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography. 119234, Leninskie Gory str., 1, bld.1, Moscow, Russia, info@geogr.msu.ru
3. A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences. 119017, Pyzhevskiy lane, 3, Moscow, Russia, ifaran@ifaran.ru
4. Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences. 119333, Gubkina str., 3, Moscow, Russia, info@iwp.ru

E-mail: stepanen@srcc.msu.ru

Abstract

In a context of the Paris Agreement, inventory of greenhouse gases emissions by various sectors of economy becomes especially important. Artificially flooded areas are well known as sources of CO₂, CH₄ and N₂O for the atmosphere, while the existing inventory methods for such objects do not explicitly take into account many important physical and biogeochemical mechanisms responsible for the formation of these emissions. A new version of the one-dimensional (in vertical) physical and biogeochemical model LAKE (version 2.3) is adapted for water bodies with significant throughflow, i.e. it takes into account the sources / sinks of all prognostic variables due to inflows and effluent streams, as well as the average vertical speed and level fluctuations. Using the model, we calculated one annual cycle (2016-2017) of the thermodynamic and hydrochemical

state of the Mozhaysk artificial reservoir, forced by the data of meteorological measurements. The model demonstrates satisfactory agreement with the observational data on the horizontal averaged vertical distribution of water temperature, dissolved oxygen and methane content in the summer of 2017. However, significant horizontal inhomogeneity is noticeable in the measurement data, especially in the methane concentration. The parameterization of horizontal heterogeneity effects is an important task for the future development of the model. According to the simulation results, from August 2016 to August 2017, the total methane flux from the reservoir to the atmosphere was 570 Mg / year, 80% of which is ebullition from the surface of the water body, 15% - the surface diffusion flux, and 5% of methane leaves the reservoir through the dam. Thus, the proposed model can be considered as a tool for inventorying the emission of greenhouse gases from artificial water bodies.

Keywords

artificial reservoirs, methane, inventory, numerical simulation

Введение

В настоящее время, в рамках Парижского соглашения по климату (<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>) предполагается координация усилий подписавших его стран по ограничению потепления климата в рамках 2°C среднеглобальной приземной температуры относительно преиндустриального уровня. Необходимой составляющей этой деятельности является инвентаризация современных выбросов парниковых газов в атмосферу на уровне государств и отдельных секторов экономики. Среди антропогенных источников углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄) можно отметить искусственно затопленные территории, в частности, водохранилища (Barros et al., 2011; Deemer et al., 2016), в которых образование парниковых газов вызвано разложением затопленного органического материала. Инвентаризация текущих выбросов парниковых газов водохранилищами затрудняется организационно-финансовыми трудностями (необходимость проведения круглогодичных измерений дорогостоящими приборами на большом количестве водных объектов) и фундаментальными ограничениями измерительных методов (отсутствие эталонного метода измерения турбулентных потоков в приземном слое атмосферы и др.). В связи с этим, в настоящее время для национальных инвентаризаций рекомендуются

<https://www.hydropower.org/gres>), не описывающие явно ключевые физические и биогеохимические механизмы формирования потоков парниковых газов в водных объектах. В данном контексте возникает задача модельно-эмпирической оценки эмиссий парниковых газов, предполагающая проверку детальных численных физико-биогеохимических моделей на имеющихся данных измерений и последующий расчёт основных составляющих углеродного баланса искусственных водных объектов с высоким временным (и – при необходимости – пространственным) разрешением. Смежная задача, которая может быть решена уже только при помощи моделирования – это прогноз эмиссии парниковых газов из существующих и проектируемых водохранилищ в условиях изменяющегося климата. Обе задачи могут быть реализованы как посредством упрощённых, одномерных по вертикали, моделей, так и с привлечением более полных трёхмерных моделей водоёма, в зависимости от доступных вычислительных ресурсов.

В настоящей работе представлена версия одномерной по вертикали численной физико-биогеохимической модели водоёма LAKE, адаптированная для расчёта эмиссий (CO_2) и метана (CH_4) в атмосферу из проточных водоёмов, в т.ч. водохранилищ. Представлены результаты проверки модели на данных измерений температуры, содержания растворённого кислорода и метана на Можайском водохранилище.

Одномерная модель проточного водоёма LAKE2.3

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 (Рисунок 1), 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:

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

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 $\Gamma_{A(z)}$ (Рисунок 1), $\mathbf{n}$ – внешняя нормаль к $\Gamma_{A(z)}$, $\mathbf{u} = (u, v)$ – горизонтальная составляющая скорости, w – вертикальная проекция скорости, F_f – суммарный (турбулентный плюс молекулярный) диффузионный поток величины f , 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 (Businger et al., 1971; Paulson, 1970)).

Уравнение для средней вертикальной скорости получается осреднением 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 (Stepanenko et al., 2016; Степаненко, 2018). Так, для расчёта коэффициентов турбулентной вязкости и температуропроводности (диффузии) используется турбулентное замыкание $k - \varepsilon$; в выражение для коэффициента

температуропроводности (диффузии) также аддитивно входит коэффициент «фоновой диффузии» (Hondzo and Stefan, 1993), 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 (Stepanenko et al., 2016), в т.ч. на максимальной глубине, так что сумма этих границ составляет всё дно водоёма. Поток импульса через поверхность дна $(F_{u,\Gamma_{A(z)}}, F_{v,\Gamma_{A(z)}})$ 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 (Степаненко и др., 2011). Недиффузионные и неадвективные потоки Φ_f – это кинематический поток радиации $\Phi_T = S$ в уравнении притока тепла (рассчитывается по закону Бэра-Бугера-Ламберта в инфракрасном, фотосинтетически-активном, 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 (McGinnis et al., 2006) 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. В этом направлении авторами был получен ряд новых результатов: так, параметризация осреднённого горизонтального градиента давления в уравнениях движения модели LAKE позволяет воспроизвести в модели сейши с горизонтальным волновым номером 1 (Степаненко и др., 2018a).

Источники и стоки $\bar{R}$ в уравнениях для биогеохимических величин задаются с привлечением параметризаций, предложенных в работах (Fang and Stefan, 1994; Hanson et al., 2004; Tan et al., 2017; Sadeghian et al., 2018; Fichot and Miller, 2010; Koehler et al., 2014) и учитывают следующие процессы:

- фотосинтез, дыхание, выделения и отмирание фито- и зоопланктона;
- 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 (Walker and Snodgrass, 1986).

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

- диффузионный поток с поверхности водоёма (коэффициент газообмена рассчитывается по модели обновления поверхности (Donelan and Wanninkhof, 2002));
- пузырьковые потоки, рассчитываемые отдельно над слоями донных отложений, находящимися на разных глубинах;
- адвективный поток через вытекающий водоток (турбины в случае гидроэлектростанций).

Модель включает многослойные модули расчёта переноса тепла и жидкой влаги в слоях льда и снега (Степаненко, 2018; Степаненко и др., 2019).

Система уравнений модели решается конечно-разностными методами (Степаненко, 2018).

Постановка численных экспериментов

Можайское водохранилище — хорошо изученный в гидрологическом и гидрохимическом отношении водный объект (Рисунок 2), расположенный в верховьях р. Москвы. Это небольшое морфометрически простое слабопроточное долинное водохранилище с отсутствием интенсивного динамического перемешивания и с коэффициентом водообмена 1.15 год^{-1} . Летом и зимой в нем наблюдается термическая стратификация (Пуклаков и др., 2015). Объем придонной водной массы с отсутствием кислорода и продолжительность ее существования связана с синоптическими условиями каждого года и с уровнем режимом водоёма. Водохранилище имеет асимметричный продольный профиль с

увеличением максимальной глубины в затопленном русле р. Москвы от 5–7 м в верховьях до 20–23 м у плотины. Глубина затопленной поймы возрастает от 2–3 до 10–12 м, соответственно. В последние годы на водохранилище, помимо стандартных измерений термодинамических, гидрохимических и метеорологических величин, проводятся также всесезонные наблюдения концентрации и потоков метана (Гречушникова и др., 2019), что открывает возможность проверки модели LAKE на данном водном объекте.

Форма водоёма задавалась известной для данного водоёма гипсометрической зависимостью $A(z)$, коэффициент ослабления фотосинтетически-активной радиации принят 1.04 м^{-1} (среднее значение по данным наблюдений). Количество слоёв конечно-разностной схемы по вертикали в водной толще принято равным 40 (при начальной максимальной глубине водоёма $H = 22.7 \text{ м}$), в слоях льда и донных отложений – 10, шаг по времени – 20 с. Количество колонок донных отложений – 5, глубиной 10 м каждая.

Параметризация сейш (Степаненко, 2018а) в модели не использовалась, т.к. она не отлажена на настоящий момент для случаев перехода стратификации через безразличную в течение года (весной и осенью).

Для модельных расчётов был выбран период с 1 августа 2016 г. по 30 сентября 2017 г. Для верхних граничных условий использовались данные основных метеорологических величин (температуры, влажности воздуха, модуля скорости ветра, атмосферного давления), измеренные на метеорологической станции г. Можайска и доступные на сайте gr5.ru. Интенсивность атмосферных осадков была задана по данным метеостанции в г. Наро-Фоминске. Нисходящие потоки коротко- и длинноволновой радиации были измерены на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН. Все временные ряды интерполированы к разрешению 1 ч. Температура и влажность воздуха, измеренные на метеостанции, были пересчитаны для учёта внутреннего пограничного слоя над водоёмом с применением формул А.П.Браславского (Мишон, 1983). Скорость ветра также была пересчитана с привлечением статистической зависимости между скоростью ветра на метеостанции и в приводном слое над водохранилищем, полученной в предыдущие годы измерений.

Начальные условия для вертикального распределения температуры, растворённого кислорода, углекислого газа, метана и неорганического фосфора заданы по данным вертикального зондирования на Красновидовском плёсе (отсек IV на Рисунке 2). Данных измерений по остальным прогностическим переменным (включая горизонтальные компоненты скорости) не было, поэтому их вертикальные распределения в начальный момент были заданы нулевыми значениями. В таком случае, корректным можно считать такое сопоставление с данными наблюдений, которое начинается со времени достаточно большого, чтобы при заданных граничных условиях, начальные условия перестали влиять на траекторию решения в фазовом пространстве модели. Для димиктического водоёма эффекты начальных условий существенно уменьшаются после полного (весеннего или осеннего) перемешивания. Поэтому, в настоящей работе сравнение с данными измерений по температуре, содержанию растворённого кислорода и метана производилось для периода июнь-август 2017 г.

Расход притоков водохранилища задавался по данным АО «Мосводоканал», температура притоков рассчитывалась по эмпирической связи с температурой воздуха, концентрация кислорода в притоках оценивалась из условия равновесия с атмосферным содержанием, концентрация метана в притоках, по причине недостатка измерений этой величины, полагалась равной 0 (расчёты с заданием характерных измеренных значений содержания CH_4 продемонстрировали очень малую чувствительность модели). Уровень воды H задавался по данным измерений на плотине водохранилища, а расход воды через дамбу – как остаточный член уравнения (3). Интервал глубин вытекающего водотока на дамбе задавался равным 14.9-16.9 м. Отметим, что в этом случае при поступлении воды из притоков в приповерхностный слой водохранилища в силу уравнения (2) в модели возникает средняя вертикальная скорость, переносящая объём на глубину вытекающего потока.

При калибровке модели подбирались оптимальные значения следующих параметров:

- константа, регулирующая фоновый коэффициент температуропроводности и диффузии (Nondzo and Stefan, 1993), C_T ;

- параметры поглощения кислорода донными отложениями в параметризации (Walker and Snodgrass, 1986), C_{O1} , C_{O2} ;
- максимальная скорость окисления метана кислородом в формуле Михаэлис-Ментен (Paul and Clark, 1996), C_{M1} ;
- константа генерации метана в донных отложениях (Степаненко и др., 2010), C_{M2} .

Примечательно, что подбор этих параметров может производиться последовательно в приведённом порядке. Дело в том, что C_T влияет на распределение температуры, кислорода и метана, но распределение температуры не зависит от C_{O1} , C_{O2} , C_{M1} , C_{M2} . Таким образом оптимизация C_T может производиться только по целевому функционалу ошибки температуры. Далее, также известно, что содержание кислорода существенно зависит от C_{O1} , C_{O2} , однако слабо зависит от C_{M1} , C_{M2} , поэтому при найденном на предыдущем этапе оптимальном значении C_T^* ищутся C_{O1}^* , C_{O2}^* , минимизирующие ошибку воспроизведения растворённого кислорода. На третьем этапе производится поиск оптимальных значений C_{M1}^* , C_{M2}^* , доставляющие минимум ошибке расчёта концентрации метана.

Результаты и обсуждение

Ключевыми факторами годового хода вертикального распределения метана и его эмиссии в атмосферу являются температурная стратификация и распределение кислорода, поскольку стратификация определяет режим перемешивания, а кислород – окисление метана (основной сток метана на пути от донных отложений к поверхности). Эти обстоятельства определяют порядок рассмотрения упомянутых величин в настоящем разделе.

Температура воды

Эволюция вертикального распределения температуры воды по результатам моделирования показан на Рисунке 3. Отчётливо видны два периода летней прямой стратификации, осенняя и весенняя гомотермия, зимняя (подлёдная) обратная стратификация. Слабое повышение придонной температуры в течение ледостава является следствием переноса тепла от относительно тёплых донных отложений. Отметим, что перенос тепла вниз в период летней стратификации, заметный по наклону изотерм, обусловлен действием фоновой теплопроводности (Hondzo and Stefan, 1993); в её отсутствие ниже верхнего перемешанного слоя температура в модели до начала осеннего перемешивания почти не

повышается (турбулентное замыкание $k - \varepsilon$ при сверхкритических значениях числа Ричардсона даёт нулевые значения коэффициентов турбулентного обмена).

На рисунке 4 показано сравнение вертикального распределения температуры по результатам расчётов и измерений. Здесь и далее приводятся данные измерений для пяти отсеков водохранилища (Рисунок 2), а также осреднённые по горизонтальному сечению значения, рассчитанные с учётом площади каждого отсека. Напомним, что по построению модели, она рассчитывает именно горизонтально осреднённые значения. Как видно, модель успешно воспроизводит летнюю стратификацию Можайского водохранилища, несмотря на существенную неоднородность температуры по горизонтали (до 4-5 °C в эпилимнионе).

Примечательно, что модель воспроизводит не только самые общие черты профиля температуры (толщину сдвигово-перемешанного эпилимниона, градиент температуры в металимнионе), но и более тонкие эффекты. Например, на профиле температуры 18 июня 2017 г. (Рисунок 4а) и в эмпирических, и в модельных данных видно наличие двух перемешанных слоёв – текущего эпилимниона и «старого» эпилимниона (в диапазоне глубин 3-10 м), вызванного глубоким перемешиванием на предыдущем этапе эволюции стратификации.

Вторую особенность можно заметить при сравнении профилей температуры 5 и 10 июня 2017 г. (Рисунок 4б-в), где заметно примерно двукратное увеличение (с 5 м до 10 м) глубины эпилимниона, произошедшее за эти 5 дней. В этот период произошло интенсивное выпадение осадков, в результате расход втекающих водотоков увеличился до 70 м³/с (до и после события расход составлял 5-10 м³/с), и вертикальная скорость $\bar{w}$ в модели превысила 1 м/сут. Этот вертикальный перенос и обусловил в модели заглубление верхнего перемешанного слоя. При этом ветровое перемешивание, обусловленное сопутствующими сильным дождю высокими значениями скорости ветра при условии $\bar{w} = 0$ не даёт в модели указанное заглубление (результаты этого численного эксперимента в статье не приводятся).

Растворённый кислород

Распределение растворённого кислорода в модели в течение года определяется, в первую очередь, температурной стратификацией и самой температурой воды (ср. Рисунки 5 и 3). Важными источниками кислорода являются процесс фотосинтеза, а также газообмен с атмосферой. Оба процесса происходят в эпилимнионе, в то время как в мета- и гипolimнионе кислород потребляется донными отложениями и в водной толще на разложение органических остатков. Поэтому в условиях слабого диффузионного обмена между эпи- и гипolimниона летом содержание кислорода в глубоких слоях сокращается. Зимой газообмен с атмосферой практически прекращается из-за ледостава, к тому же

проникающая под лёд ФАР невелика, что вызывает уменьшение содержания O_2 по всему водному столбу. Максимальная за год концентрация кислорода достигается перед ледоставом и сразу после вскрытия льда, что обусловлено в модели высокой растворимостью кислорода при низкой температуре. Можно показать, что в модели при условии баланса продукции органического вещества (с выделением O_2) и его деструкции (с поглощением O_2) в перемешанном слое концентрация кислорода определяется равенством поступления кислорода из атмосферы и поглощения его донными отложениями. Из этого следует, что содержание кислорода в эпилимнионе определяется его растворимостью. При этом, данные наблюдений свидетельствуют о том, что упомянутый выше баланс может нарушаться, например, при стремительном росте биомассы водорослей (см. ниже).

В данных наблюдений (Рисунок 6) видна существенная горизонтальная неоднородность растворённого O_2 . Модель воспроизводит глубину гипоксидного слоя, однако существенно отклоняется от наблюдений в абсолютных значениях содержания O_2 в эпилимнионе, за исключением измерений в приплотинном (наиболее глубоком) отсеке водохранилища. В первой половине лета 2017 г. (Рисунок 6а-в) модель систематически завышает концентрацию кислорода, а в августе (Рисунок 6г) – занижает. Повышенное количество кислорода в эпилимнионе в августе (водоём становится источником этого газа для атмосферы) традиционно объясняется быстрым развитием фотосинтезирующих сине-зелёных водорослей. В модели LAKE этот тип микроорганизмов явно не учитывается.

Отметим также эффект заглубления насыщенного кислородом верхнего слоя между 5 и 10 июля 2017 г. (Рисунок 6б-в), аналогичный изменениям профиля температуры (Рисунок 4б-в) и также вызванный упорядоченным вертикальным движением воды в период сильного паводка.

Ошибка модели в оценке содержания кислорода в перемешанном слое сказывается на окислении метана в эпилимнионе пренебрежимо, т.к. и измеренные, и рассчитанные значения, по меньшей мере, на порядок превосходят константу полунасыщения относительно O_2 (0.64 мг/л согласно работе (Lidstrom and Somers, 1984)).

Растворённый метан и потоки метана в атмосферу

Рисунок 7 показывает, что по данным моделирования распределение метана в координатах «время-глубина» обратно распределению кислорода, что характерно для многих водоёмов. Причиной является тот факт, что источником метана служат донные отложения, а стоком – атмосфера, в то время кислород – наоборот – образуется в верхнем слое водоёма, а в донных отложениях поглощается; кроме того, в присутствии кислорода метан быстро окисляется, и его содержание становится пренебрежимо малым. Максимальное за год содержание метана достигается в придонном слое перед сходом ледостава.

Измерения содержания метана летом 2017 г. (Рисунок 8) показывают, что на одном горизонте эта величина может меняться на несколько порядков. Кроме того, в пределах отдельных отсеков водохранилища концентрация метана не всегда меняется с глубиной монотонно, что не объясняется классической концепцией формирования профиля CH_4 , изложенной в предыдущем абзаце и требует проверки гипотез о дополнительных механизмах формирования метана, например, в аэробных условиях (Khatun et al., 2019).

Невозможность воспроизвести в одномерной модели горизонтальную неоднородность распределения CH_4 не означает, что нет возможности рассчитать с высокой точностью средний по поверхности поток метана в атмосферу путём калибровки соответствующих параметров. Так, на Рисунке 8 видно, что среднюю по поверхности концентрацию CH_4 модель рассчитывает удовлетворительно, что даёт основания считать, что и диффузионный поток в атмосферу оценивается моделью реалистично. Представляется также, что некоторые механизмы формирования горизонтальной изменчивости CH_4 могут быть в модели параметризованы. Так, горизонтальное распределение метана в перемешанном слое может быть удовлетворительно описано аналитическими решениями (DelSontro et al., 2018), которые воспроизводят увеличение количества CH_4 при приближении к поверхности донных отложений; подобные решения могут быть использованы в рамках горизонтального осреднения, используемого в одномерной модели. Другая возможность уточнения модели заключается в задании различных параметров генерации метана для донных отложений, находящихся на разных глубинах; эти параметры измеряются в ходе инкубаций отобранных донных отложений (например, (Fuchs et al., 2016)).

Рисунок 9 показывает временные ряды диффузионного и пузырькового потоков CH_4 в атмосферу, а также потока через дамбу по результатам модели LAKE2.3. Предполагается, что всё количество метана, покидающее водоём через дамбу, попадает в атмосферу. Эта величина в действительности является верхней оценкой эмиссии в атмосферу, т.к. часть метана остаётся в растворённой фазе и впоследствии окисляется в водотоке, вытекающем из нижнего бьефа.

Потоки метана демонстрируют высокую изменчивость во времени. Высокочастотная часть этой изменчивости обусловлена суточным и синоптическим воздействием атмосферы. Колебания пузырькового потока связаны, в основном, с колебаниями атмосферного давления (определяющего критическую концентрацию растворённого метана в донных отложениях), т.к. область влияния колебаний других метеорологических величин ограничивается только верхним перемешанным слоем или слоем до глубины вытекающего водотока (при учёте вертикальной адвекции). Диффузионный поток, напротив, чувствителен к турбулентному режиму в эпилимнионе, и поэтому его высокочастотная

изменчивость определяется скоростью ветра и потоком плавучести на поверхности. Высокочастотная изменчивость потока CH_4 через дамбу характеризуется более длинными временными масштабами и вызвана паводковыми событиями и операциями по контролю водного баланса водохранилища на дамбе.

В течение периодов прямой стратификации пузырьковый поток метана преобладает по порядку величины, что вызвано подавлением диффузионного потока окислением CH_4 в эпилимнионе. В периоды весеннего и осеннего перемешивания эти потоки сравниваются по порядку. Этому способствует перенос накопленного в период стратификации придонного метана к поверхности. Одновременно кислород переносится в придонные слои, окисляя метан, так что итоговый эффект полного перемешивания водной толщи на диффузионный поток в атмосферу зависит от соотношения характерных времён турбулентной диффузии и окисления CH_4 ; это отношение требует дополнительного исследования. Отметим также, что в период полного перемешивания пузырьковый поток метана невелик относительно характерных летних значений из-за низкой температуры дна и, соответственно, низкой генерации метана.

В период ледостава диффузионный поток считается равным 0, в то время как доля пузырькового потока, достигающего границы «вода-лёд» (в текущей версии модели принята равной 0.1 (Степаненко и др., 2011)), попадает в атмосферу через трещины, полыньи, а также незамерзающие лунки в точках выхода интенсивных пузырьковых струй. Суммарное количество метана, покинувшее Можайское водохранилище за период с 1 августа 2016 г. по 1 августа 2017 г. по результатам моделирования, составило 570 Мг/год, из них: пузырьковый поток 455 Мг/год (80%), диффузионный 87 Мг/год (15%), поток через дамбу 28 Мг/год (5%). Проведённые к настоящему времени измерения на Можайском водохранилище не позволяют получить аналогичные оценки с достаточной точностью, однако предварительное сравнение позволяет заключить, что по крайней мере летние диффузионные потоки воспроизводятся моделью достаточно точно. Кроме того, преобладание пузырькового потока в структуре годовой эмиссии метана отмечается на многих других водохранилищах (Deemer et al., 2016).

Заключение

В работе представлена новая версия одномерной по вертикали физико-биогеохимической модели LAKE (версия 2.3), адаптированная для проточных водоёмов в части учёта источников и стоков всех прогностических переменных за счёт притоков и вытекающих водотоков, а также переноса переменных средней вертикальной скоростью. В модель также

включены колебания уровня, вызванные изменчивостью основных компонент водного баланса.

С помощью модели проведён расчёт одного годового цикла (2016-2017 гг.) термодинамического и гидрохимического состояния Можайского водохранилища, в котором в граничных условиях использовались данные приземных измерений основных метеорологических величин и потоков радиации. Модель демонстрирует удовлетворительное согласие с данными наблюдений об осреднённом по горизонтали вертикальном распределении температуры воды летом 2017 г. Основные особенности вертикальных профилей содержания растворённого кислорода и метана также воспроизведены, однако наличие существенной горизонтальной неоднородности концентрации CH_4 вызывает вопрос о её важности в формировании суммарных эмиссий в атмосферу. По результатам моделирования, в период с августа 2016 г. по август 2017 г. суммарный поток метана из водохранилища в атмосферу составил 570 Мг/год, из них 80% приходится на пузырьковый поток с поверхности водного объекта, 15% - на диффузионный поток с поверхности, и 5% метана покидает водохранилище через дамбу.

В дальнейшем предполагается развитие настоящей работы в следующих направлениях:

- проверка модели по данным наблюдений на Можайском водохранилище за более широкий временной промежуток и по другим переменным, включая потоки парниковых газов;
- параметризация эффектов горизонтальной неоднородности распределения биогеохимических переменных на вертикальное распределение концентрации парниковых газов;
- включение в модель эмпирических данных об изменении с глубиной скорости генерации метана в донных отложениях, вызванном составом органического субстрата;
- обновление биогеохимического блока с учётом новых знаний о механизмах метанообразования в пресноводных водоёмах, включая аэробную генерацию.

Авторы считают, что в перспективе предложенная в настоящей работе модель может быть рассмотрена как инструмент для инвентаризации эмиссии парниковых газов из искусственных водных объектов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 19-15-50265 (в части усовершенствования физического блока модели для учёта проточности водоёма) и МД-1850.2020.5 (в части развития биогеохимического блока модели) и соответствует научной программе Московского центра фундаментальной и прикладной математики. Авторы благодарят

Шукурова К.А. за предоставленные данные измерений коротковолновой и длинноволновой радиации.

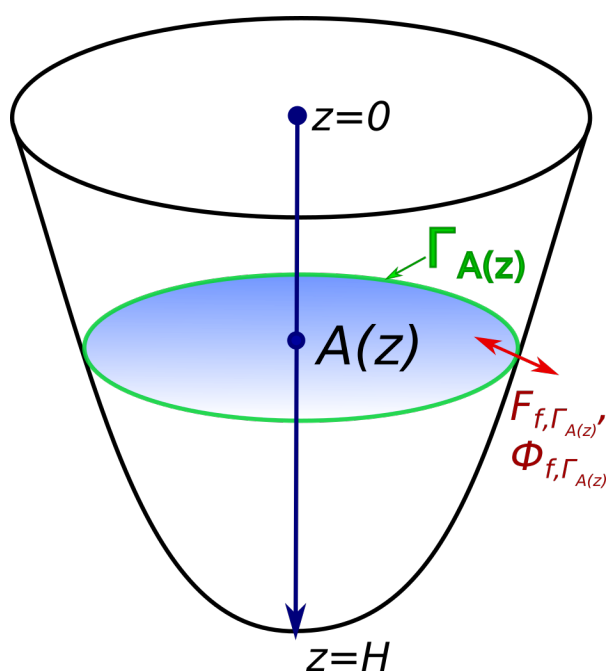


Рисунок 1. Схема, поясняющая осреднение по горизонтальному сечению $A(z)$ водного объекта, применяемое для получения уравнений одномерной модели; обозначения расшифрованы в тексте



Рисунок 2. Схема Можайского водохранилища и расположение станций гидрологической съёмки

I-V – станции съёмки; 1 – пункты отбора проб, 2 – пункт постановки плавучей камеры, 3 – населённые пункты, 4 – затопленная русловая сеть.

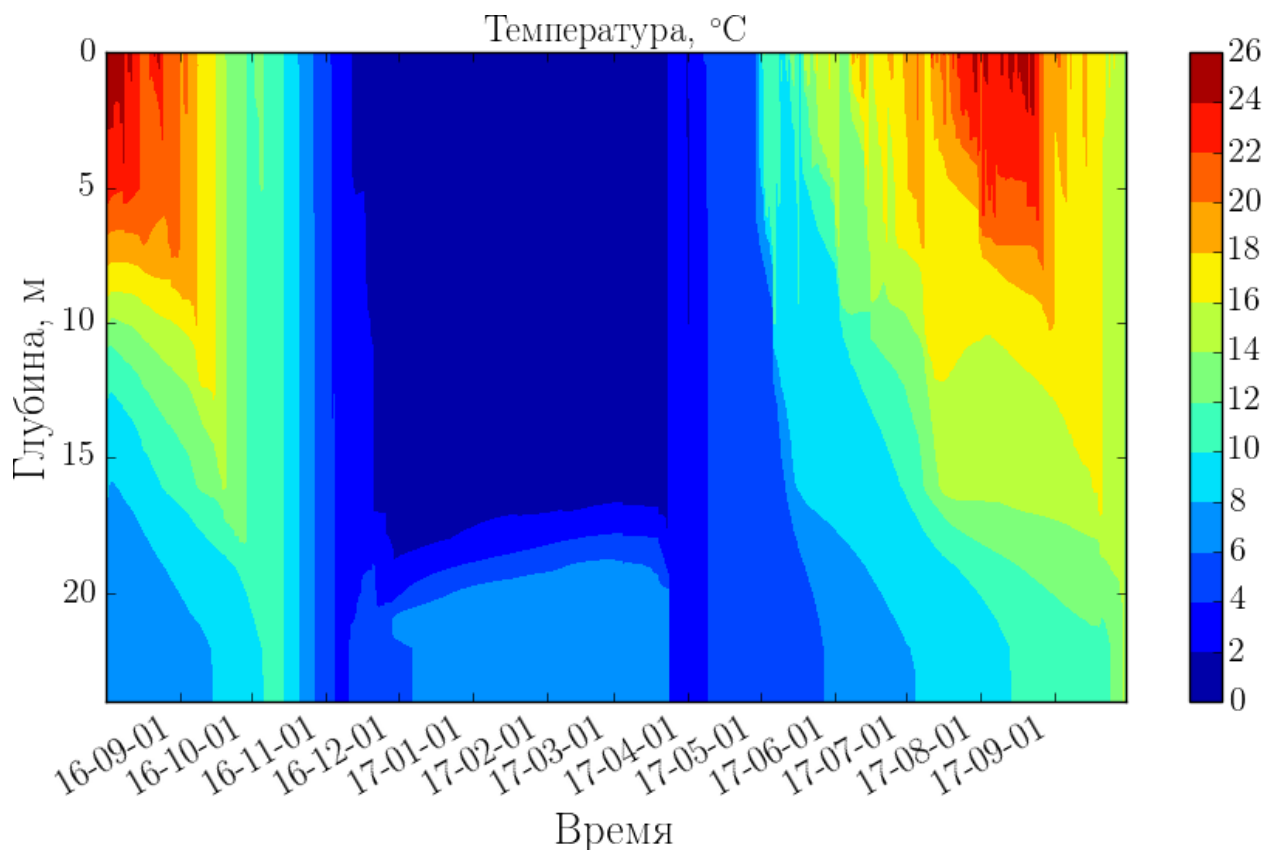


Рисунок 3. Эволюция вертикального распределения температуры воды в Можайском водохранилище в 2017 г. по результатам моделирования

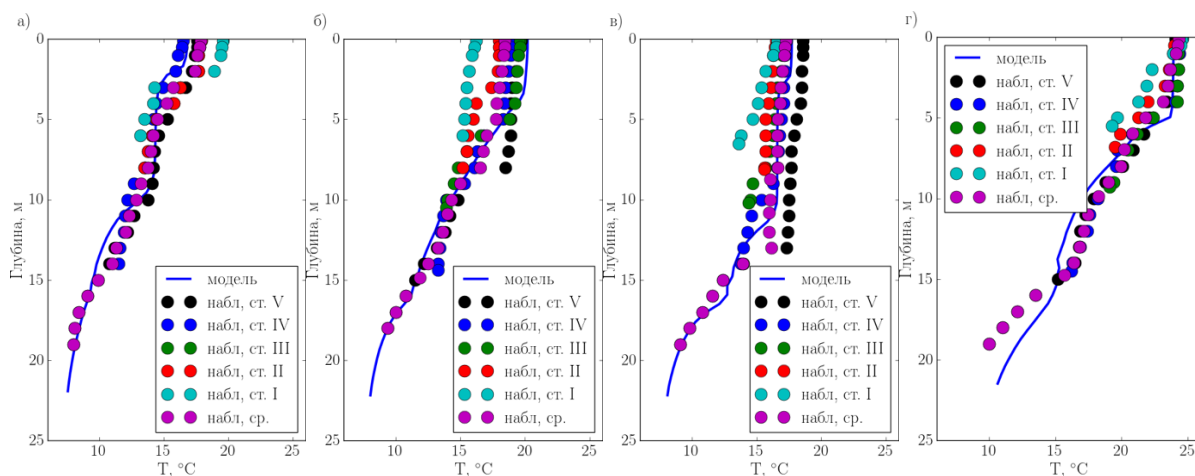


Рисунок 4. Вертикальное распределение температуры в Можайском водохранилище летом 2017 г. по результатам моделирования и данным измерений

а) 18 июня 12:00 мск, б) 5 июня 16:00 мск, в) 10 июня 18:00 мск, г) 20 августа 17:00 мск;
 римскими цифрами указаны станции измерений (см. Рисунок 1)

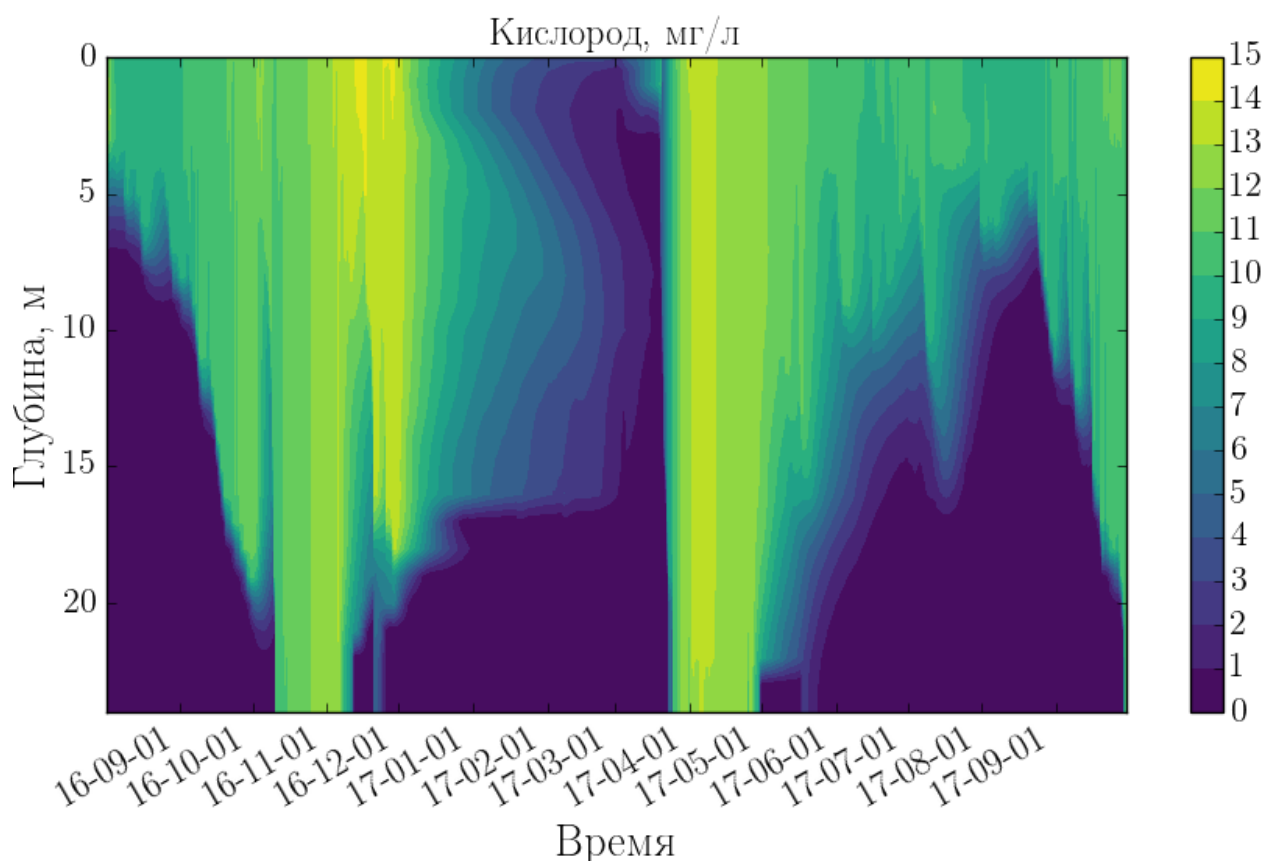


Рисунок 5. Эволюция вертикального распределения массовой концентрации растворённого кислорода в Можайском водохранилище в 2017 г. по результатам моделирования

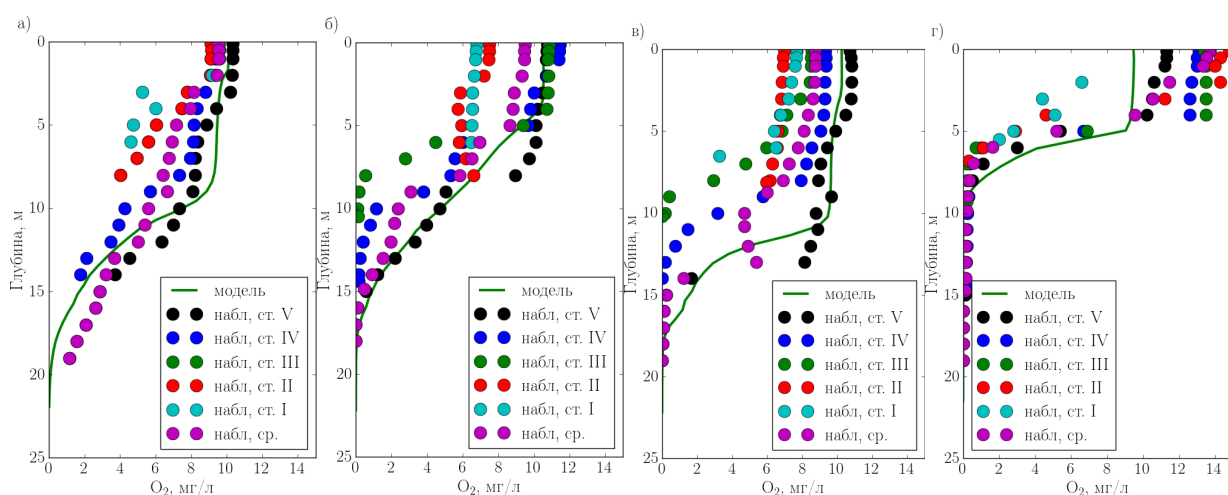


Рисунок 6. Вертикальное распределение массовой концентрации растворённого кислорода в Можайском водохранилище летом 2017 г. по результатам моделирования и данным измерений

а) 18 июня 12:00 мск, б) 5 июня 16:00 мск, в) 10 июня 18:00 мск, г) 20 августа 17:00 мск;
римскими цифрами указаны станции измерений (см. Рисунок 1)

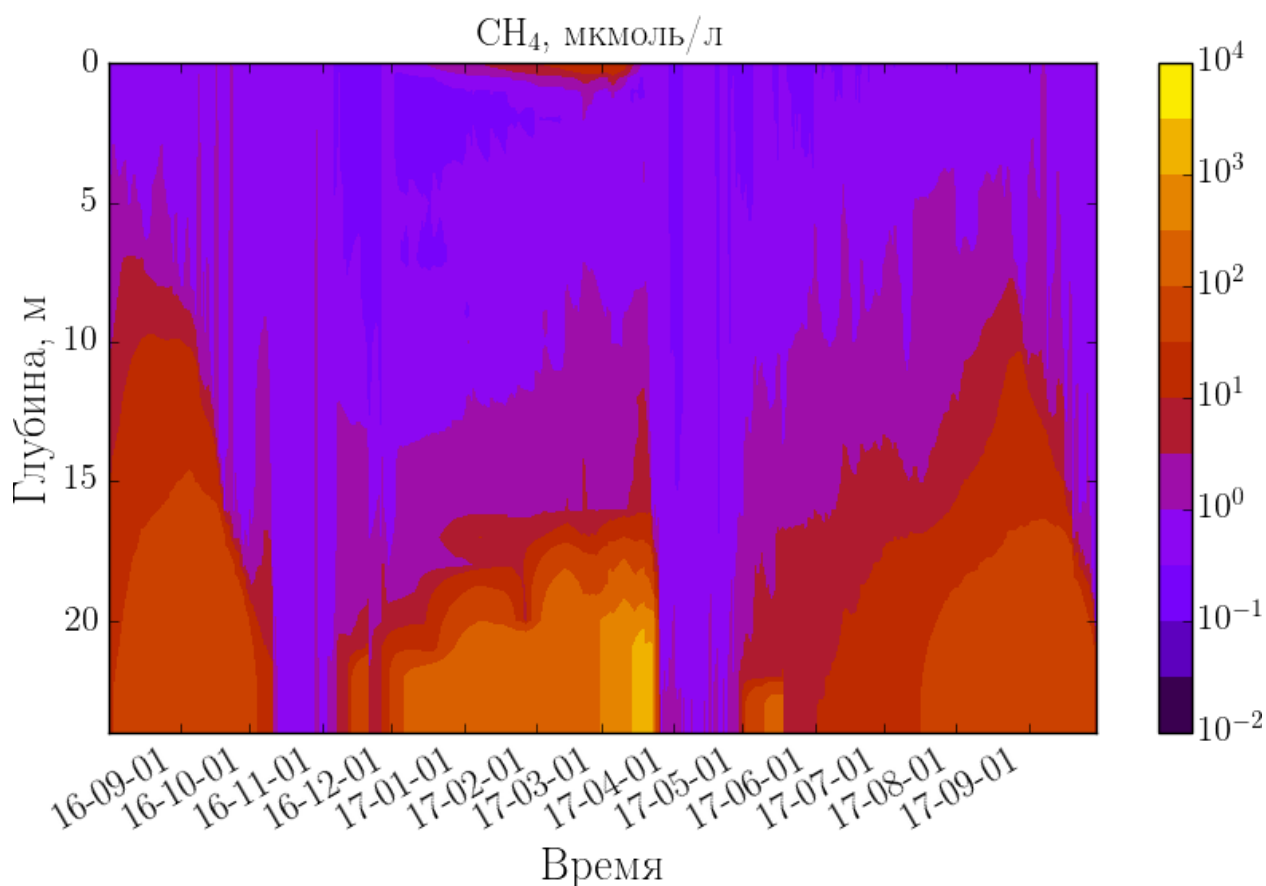


Рисунок 7. Эволюция вертикального распределения счётной концентрации растворённого метана в Можайском водохранилище в 2017 г. по результатам моделирования

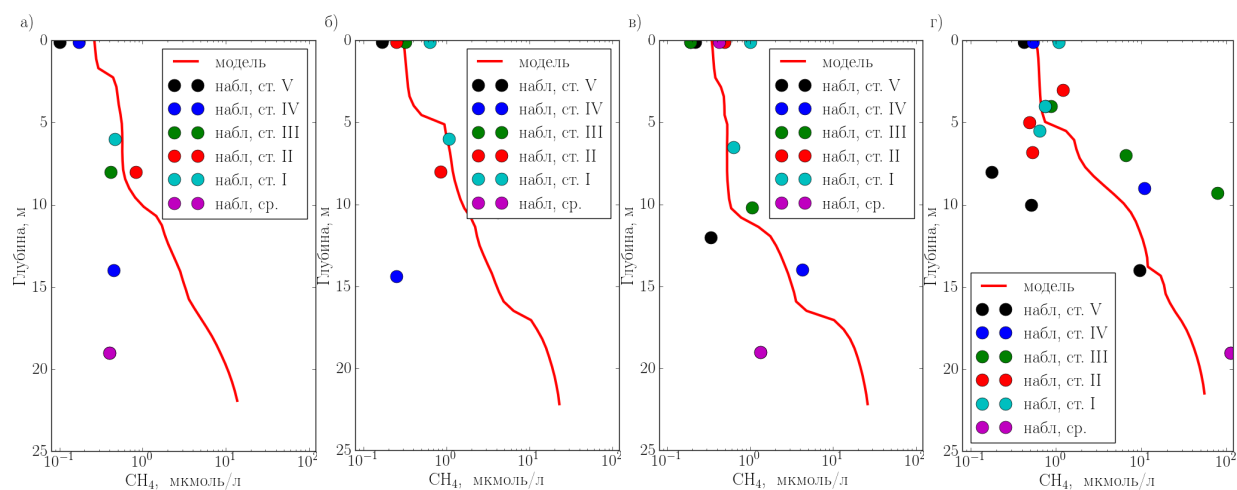


Рисунок 8. Вертикальное распределение мольной концентрации растворённого метана в Можайском водохранилище летом 2017 г. по результатам моделирования и данным измерений

а) 18 июня 12:00 мск, б) 5 июня 16:00 мск, в) 10 июня 18:00 мск, г) 20 августа 17:00 мск;
римскими цифрами указаны станции измерений (см. Рисунок 1)

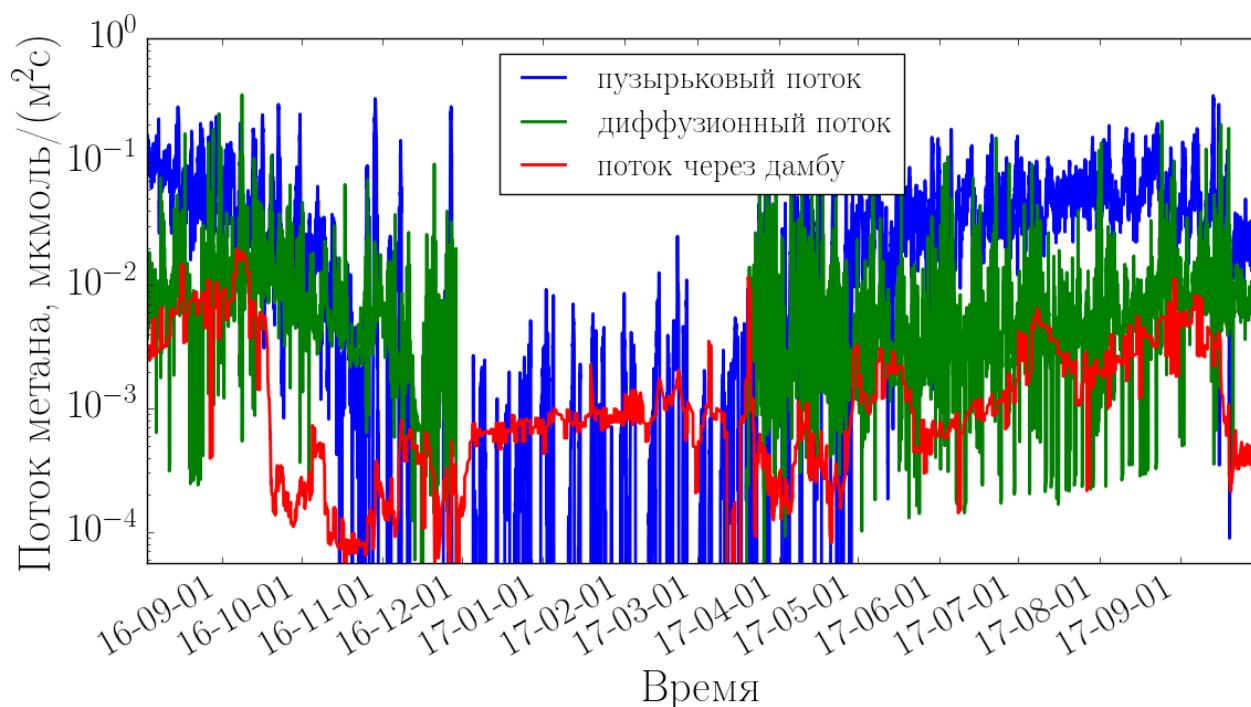


Рисунок 9. Временные ряды потоков метана в атмосферу из Можайского водохранилища, нормированные на площадь поверхности водоёма по результатам моделирования

Список литературы

Гречушникова М.Г., Репина И.А., Степаненко В.М., Казанцев В.С., Артамонов А.Ю., Ломов В.А. 2019. Эмиссия метана с поверхности долинного водохранилища. - География и Природные Ресурсы, №3, с. 77–85.

Мишон М.М. 1983. Практическая гидрофизика. - Л., Гидрометеиздат, 176 с.

Пуклаков В.В., Даценко Ю.С., Гончаров А.В., Эдельштейн К.К., Гречушникова М.Г., Ершова М.Г., Белова С.Л., Соколов Д.И., Пуклакова Н.Г., Ерина О.Н., Аракельянц А.Д. 2015. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз). — М.: Перо, 284 с.

Степаненко В.М., Мачульская Е.Е., Глаголев М.В., Лыкосов В.Н. 2011. Моделирование эмиссии метана из озер зоны вечной мерзлоты. - Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана, т. 47, № 2, с. 275–288.

Степаненко В.М. 2018а. Параметризация сейш для одномерной модели водоёма. - Труды МФТИ, т. 10, № 1, с. 97–111.

Степаненко В.М. 2018. Математическое моделирование теплового режима и динамики парниковых газов в водоёмах суши. - Дисс. ... д-ра ф.-м. наук – М., 361 с.

Степаненко В.М., Репина И.А., Ганбат Г., Даваа Г. 2019. Моделирование ледового режима соленых озер. - Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана, т. 55, № 1, с. 152–163.

Barros N., Cole J.J., Tranvik L.J., Prairie Y.T., Bastviken D., Huszar V.L.M., ... Roland F. 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. - *Nature Geoscience*, vol. 4(9), pp. 593–596.

Businger J.A., Wyngaard J.C., Izumi Y., Bradley E.F. 1971. Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer. - *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 28(2), pp. 181–189.

Chapra S.C. 2008. *Surface water-quality modeling*. - Waveland Pr Inc., 844 p.

Deemer B.R., Harrison J.A., Li S., Beaulieu J.J., DelSontro T., Barros N., ... Vonk J.A. 2016. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis.- *BioScience*, vol. 66(11), pp. 949–964.

DelSontro T., del Giorgio P.A., Prairie Y.T. 2018. No Longer a Paradox: The Interaction Between Physical Transport and Biological Processes Explains the Spatial Distribution of Surface Water Methane Within and Across Lakes. - *Ecosystems*, vol. 21(6), pp. 1073–1087.

Donelan M.A., Wanninkhof R. 2002. Gas Transfer at Water Surface - Concepts and Issues. – *Gas Transfer at Water Surfaces*, vol. 127, pp. 1–10.

Fichot C.G., Miller W.L. 2010. An approach to quantify depth-resolved marine photochemical fluxes using remote sensing: Application to carbon monoxide (CO) photoproduction. - *Remote Sensing of Environment*, vol. 114(7), pp. 1363–1377.

Fuchs A., Lyautey E., Montuelle B., Casper, P. 2016. Effects of increasing temperatures on methane concentrations and methanogenesis during experimental incubation of sediments from oligotrophic and mesotrophic lakes. - *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol. 121(5), pp. 1394–1406.

Hanson P.C., Pollard A.I., Bade D.L., Predick K., Carpenter S.R., Foley J.A. 2004. A model of carbon evasion and sedimentation in temperate lakes. - *Global Change Biology*, vol. 10(8), pp. 1285–1298.

Hondzo M., Stefan H.G. 1993. Lake Water Temperature Simulation Model. - *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 119(11), pp. 1251–1273.

Khatun S., Iwata T., Kojima H., Fukui M., Aoki T., Mochizuki S., ... Uzawa R. 2019. Aerobic methane production by planktonic microbes in lakes. - *Science of The Total Environment*, vol. 696, p. 133916.

Koehler B., Landelius T., Weyhenmeyer G.A., Machida N., Tranvik L.J. 2014. Sunlight-induced carbon dioxide emissions from inland waters. - *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 28(7), pp. 696–711.

Lidstrom M.E., Somers L. 1984. Seasonal study of methane oxidation in lake Washington. - *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 47(6), pp. 1255–1260.

McGinnis D.F., Greinert J., Artemov Y., Beaubien S.E., Wüest A. 2006. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? - *Journal of Geophysical Research*, vol. 111(C9), p. C09007.

Paul E.A., Clark F.E. 1996. *Soil Microbiology and Biochemistry* (2 edition). - San Diego, Academic Press, 340 p.

Paulson C.A. 1970. The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer. - *Journal of Applied Meteorology*, vol. 9(6), pp. 857–861.

Sadeghian A., Chapra S.C., Hudson J., Wheeler H., Lindenschmidt K.-E. 2018. Improving in-lake water quality modeling using variable chlorophyll a/algal biomass ratios. - *Environmental Modelling & Software*, vol. 101, pp. 73–85.

Stefan H.G., Fang X. 1994. Dissolved oxygen model for regional lake analysis. - *Ecological Modelling*, vol. 71(1–3), pp. 37–68.

Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykosov V., Vesala T. 2016. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. - *Geoscientific Model Development*, vol. 9(5), pp. 1977–2006.

Tan Z., Zhuang Q., Shurpali N. J., Marushchak M. E., Biasi C., Eugster W., Walter Anthony K. 2017. Modeling CO₂ emissions from Arctic lakes: Model development and site-level study. - *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 9(5), pp. 2190–2213.

Walker R.R., Snodgrass W.J. 1986. Model for Sediment Oxygen Demand in Lakes. - *Journal of Environmental Engineering*, vol. 112(1), pp. 25–43.

References

Grechushnikova M. G., Repina I. A., Stepanenko V. M., Kazantsev V. S., Artamonov A. Yu, Lomov V. A. 2019. Methane emission from the surface of the Mozhaishk valley-type reservoir. *Geography and Natural Resources*, vol. 40(3), pp. 247–255.

Mishon M.M. 1983. *Prakticheskaya gidrofizika* [Practical Hydrophysics]. Leningrad, 176 p.

Puklakov V.V., Dacenko Yu.S., Goncharov A.V., Edel'shtejn K.K., Grechushnikova M.G., Ershova M.G., Belova S.L., Sokolov D.I., Puklakova N.G., Erina O.N., Arakel'yanc A.D. 2015. *Gidroekologicheskij rezhim vodohranilishch Podmoskov'ya (nablyudeniya, diagnost, prognoz)* [Hydroecological regime of Moscow region reservoirs (observation, diagnosis, prognosis)]. Moscow. 284 p.

Stepanenko V. M., Machul'skaya E. E., Glagolev M. V., Lykosov V. N. 2011. Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone. *Izvestiya - Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 47(2), pp. 252–264.

Stepanenko V.M. 2018a. Parametrizatsiya seishh dlya odnomernoj modeli vodoyoma [Seiche parameterization for a one-dimensional lake model]. *Trudy MFTI - Proceedings of MIPT*, vol. 10, no. 1, pp. 97–111.

Stepanenko V.M. 2018. *Matematicheskoe modelirovanie teplovogo rezhima i dinamiki parnikovyyh gazov v vodoyomah sushi* [Mathematical modeling of the thermal regime and dynamics of greenhouse gases in land bodies of water]. Doctor's thesis. Moscow, 361 p.

Stepanenko V. M., Repina I. A., Ganbat G., Davaa G. 2019. Numerical simulation of ice cover of saline lakes. *Izvestiya - Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 55(1), pp. 129–138.

Barros N., Cole J.J., Tranvik L.J., Prairie Y.T., Bastviken D., Huszar V.L.M., ... Roland F. 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience*, vol. 4(9), pp. 593–596.

Businger J.A., Wyngaard J.C., Izumi Y., Bradley E.F. 1971. Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 28(2), pp. 181–189.

Chapra S.C. 2008. *Surface water-quality modeling*. Waveland Pr Inc., 844 p.

Deemer B.R., Harrison J.A., Li S., Beaulieu J.J., DelSontro T., Barros N., ... Vonk J.A. 2016. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. *BioScience*, vol. 66(11), pp. 949–964.

DelSontro T., del Giorgio P.A., Prairie Y.T. 2018. No Longer a Paradox: The Interaction Between Physical Transport and Biological Processes Explains the Spatial Distribution of Surface Water Methane Within and Across Lakes. *Ecosystems*, vol. 21(6), pp. 1073–1087.

Donelan M.A., Wanninkhof R. 2002. Gas Transfer at Water Surface - Concepts and Issues. *Gas Transfer at Water Surfaces*, vol. 127, pp. 1–10.

Fichot C.G., Miller W.L. 2010. An approach to quantify depth-resolved marine photochemical fluxes using remote sensing: Application to carbon monoxide (CO) photoproduction. *Remote Sensing of Environment*, vol. 114(7), pp. 1363–1377.

Fuchs A., Lyautey E., Montuelle B., Casper, P. 2016. Effects of increasing temperatures on methane concentrations and methanogenesis during experimental incubation of sediments from oligotrophic and mesotrophic lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol. 121(5), pp. 1394–1406.

Hanson P.C., Pollard A.I., Bade D.L., Predick K., Carpenter S.R., Foley J.A. 2004. A model of carbon evasion and sedimentation in temperate lakes. *Global Change Biology*, vol. 10(8), pp. 1285–1298.

Hondzo M., Stefan H.G. 1993. Lake Water Temperature Simulation Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 119(11), pp. 1251–1273.

Khatun S., Iwata T., Kojima H., Fukui M., Aoki T., Mochizuki S., ... Uzawa R. 2019. Aerobic methane production by planktonic microbes in lakes. *Science of The Total Environment*, vol. 696, p. 133916.

Koehler B., Landelius T., Weyhenmeyer G.A., Machida N., Tranvik L.J. 2014. Sunlight-induced carbon dioxide emissions from inland waters. *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 28(7), pp. 696–711.

Lidstrom M.E., Somers L. 1984. Seasonal study of methane oxidation in lake Washington. *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 47(6), pp. 1255–1260.

McGinnis D.F., Greinert J., Artemov Y., Beaubien S.E., Wüest A. 2006. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? *Journal of Geophysical Research*, vol. 111(C9), p. C09007.

Paul E.A., Clark F.E. 1996. *Soil Microbiology and Biochemistry* (2 edition). San Diego, Academic Press, 340 p.

Paulson C.A. 1970. The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 9(6), pp. 857–861.

Sadeghian A., Chapra S.C., Hudson J., Wheeler H., Lindenschmidt K.-E. 2018. Improving in-lake water quality modeling using variable chlorophyll a/algal biomass ratios. *Environmental Modelling & Software*, vol. 101, pp. 73–85.

Stefan H.G., Fang X. 1994. Dissolved oxygen model for regional lake analysis. *Ecological Modelling*, vol. 71(1–3), pp. 37–68.

Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykosov V., Vesala T. 2016. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. *Geoscientific Model Development*, vol. 9(5), pp. 1977–2006.

Tan Z., Zhuang Q., Shurpali N. J., Marushchak M. E., Biasi C., Eugster W., Walter Anthony K. 2017. Modeling CO₂ emissions from Arctic lakes: Model development and site-level study. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 9(5), pp. 2190–2213.

Walker R.R., Snodgrass W.J. 1986. Model for Sediment Oxygen Demand in Lakes. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 112(1), pp. 25–43.