

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Ломов Виктор Александрович**

**Эмиссия метана с разнотипных водохранилищ  
(по данным измерений и математической модели)**

1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре гидрологии суши  
Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – *Гречушникова Мария Георгиевна,*  
*кандидат географических наук*
- Официальные оппоненты** – *Федоров Юрий Александрович,*  
*доктор географических наук, профессор,*  
*заведующий кафедрой физической географии,*  
*экологии и охраны природы Института наук о*  
*Земле Южного федерального университета*
- Гашкина Наталья Анатольевна,*  
*доктор географических наук, ведущий научный*  
*сотрудник лаборатории эволюционной*  
*биогеохимии и геоэкологии Института геохимии*  
*и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН*
- Ясинский Сергей Владимирович,*  
*доктор географических наук, ведущий научный*  
*сотрудник лаборатории гидрологии Института*  
*географии РАН*

Защита диссертации состоится «19» декабря 2024 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801 (тел. +7(495)939-22-38, факс +7(495)932-88-36).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3226>

Автореферат разослан «14» ноября 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Научные вопросы, связанные с углеродным циклом природных экосистем, обсуждаемая и актуальная тема в мировом научном сообществе. Все больше публикаций связано с изучением компонентов углеродного баланса. Активно исследуются вопросы, связанные с потоками углерода в различных природных и антропогенных экосистемах. Каждый новый доклад Межправительственной Группы Экспертов по Изменению Климата (МГЭИК или Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) вносит всё новые коррективы в оценки этих потоков, а также открывает новые грани исследования бюджета углерода на нашей планете [Metz B. et al., 2005; IPCC Report 2006; IPCC Refinement 2019].

Искусственные водоемы, являясь элементом антропогенного ландшафта, как и любые водные объекты суши, играют существенную роль в углеродном цикле. При этом потоки парниковых газов (ПГ) из водохранилищ и прудов в атмосферу, таких как диоксид углерода или метан, относятся к антропогенному вкладу в глобальное потепление климата. Стоит отметить, что для потоков углекислого газа на границе водоемов суши и атмосферы возможна как эмиссия, так и поглощение, в то время как для метана поглощения практически никогда не наблюдается, и поэтому искусственные водоемы являются значительным источником метана в атмосферу. Согласно докладу МГЭИК 2021 года [IPCC Report 2021] пресноводные водоемы суши – это главный источник метана в атмосферу ( $117\text{--}212 \text{ Тг С год}^{-1}$ ), и водохранилища в их составе играют весьма существенную роль, по разным оценкам их вклад может достигать 16% от общей эмиссии метана с водных экосистем [Sanuois et al., 2016]. Метан, не смотря на свою низкую концентрацию в атмосфере, имеет высокое значение потенциала глобального потепления (ПГП) по отношению к диоксиду углерода [Forster et al., 2007], являясь третьим по значимости парниковым газом в атмосфере Земли.

Для лучшего понимания процессов, связанных с метаном в водохранилищах, и точных оценок его эмиссии с искусственных водоемов необходимы подробные измерения удельных потоков метана (УПМ) с их поверхности. С помощью одних только натурных данных невозможно охватить всю пространственно-временную

неоднородность удельных потоков метана из водохранилищ, которая очень велика, что подтверждает множество исследований [Гречушникова и др., 2019; Tremblay et al., 2005; Deemer et al., 2016; Johnson et al., 2021 и т.д.]. Необходимо также внедрение в методику оценок годовой эмиссии метана численных методов и математических моделей. С помощью математических расчетов, связанных с циклом метана в водохранилищах, основанных на данных натуральных измерений возможно получить наиболее точную и репрезентативную оценку эмиссии метана из искусственных водоемов. Именно вопросу оценки эмиссии метана из разнотипных водохранилищ с помощью натуральных данных и математического моделирования и посвящена данная работа.

### **Степень разработанности темы исследования**

Изучение эмиссии метана из искусственных водоемов – важное направление исследований в тематике оценок потоков углерода в различных экосистемах. Актуальные значения выбросов метана из водохранилищ необходимы для более точного понимания антропогенного вклада в рост концентрации парниковых газов в атмосфере. Эта тема привлекает исследователей уже долгое время, и оценкам глобальных выбросов метана из водохранилищ мира посвящено множество работ [Tremblay et al., 2005; Li and Zhang, 2014; Deemer et al. 2016; Johnson et al. 2021]. Результаты этих оценок сильно различаются между собой, что связано с недостатком натуральных данных на водоемах, отсутствием более глубокого изучения пространственно-временной изменчивости потоков метана в атмосферу, а также превалированием эмпирических подходов.

На данный момент существует большое количество работ, посвященных изучению факторов, влияющих на удельные потоки метана из водохранилищ. В этих работах исследуются процессы генерации метана в водоеме [Gruca-Rokosz and Tomaszek, 2015], окисление метана в водной толще [Guerin and Abril, 2007; Reeburgh et al., 1993; Stiegl and Michmerhuizen, 1998], образование пузырьков метана и пузырьковые выбросы из водоемов [Ostrovsky et al., 2008; Miller et al., 2017]. Для водохранилищ важной компонентой эмиссии метана в атмосферу является дегазация метана при сбросах воды в нижний бьеф. Этот вопрос был хорошо изучен для искусственных водоемов тропической зоны [Kemenes et al.,

2016; Fearnside, 2004]. Проводились исследования и по теме изменчивости содержания метана в водоеме в подледный период, когда эмиссия метана не происходит из-за ледяного покрова [Spangenberg et al., 2020; Greene et al., 2014].

Исследования эмиссии метана из водохранилищ ведутся и в России. На данный момент на ряде крупных искусственных водоемов проведены серии измерений удельных потоков и концентраций метана в воде в Европейской части РФ [Дзюбан, 2010а; Дзюбан, 2010б; Гречушникова и др., 2023]. Также исследования проводились и на более отдаленных от Европейской территории России водохранилищах, например, в Сибири, на Дальнем Востоке, в южной части страны [Fedorov et al., 2015; Репина и др., 2022; Федоров и др., 2024].

**Целью работы** было исследование пространственно-временной изменчивости удельных потоков метана из разнотипных водохранилищ с помощью натуральных данных и математического моделирования.

#### **Задачи работы:**

- Проанализировать натурные данные по измерениям удельных потоков метана из разнотипных водохранилищ РФ;
- Выявить особенности пространственно-временной изменчивости удельных потоков метана и факторы, ее определяющие;
- На основании натуральных данных применить методы математического моделирования для оценки годовой эмиссии метана из изучаемых водных объектов;
- На примерах исследуемых водохранилищ продемонстрировать подходы к оценке годовой эмиссии метана с их поверхности.

#### **Объект и предмет исследования**

Объектами исследования в данной работе выступают 5 разнотипных водохранилищ России. Это Можайское, Озернинское, Иваньковское, Рыбинское и Бурейское водохранилища, для каждого из которых были получены данные о пространственно-временной изменчивости потоков метана за несколько лет наблюдений. Выбор объектов обусловлен различными свойствами водоемов и рядом их уникальных особенностей (гидрологическим режимом, климатическими

условиями и др.), чтобы на их примере показать неоднородность удельных потоков метана, обусловленную различными факторами – синоптической ситуацией, структурой донных отложений, температурным и кислородным режимом и др.

Предметом исследования выступают процессы, связанные с циклом метана в экосистеме водохранилища – генерация метана в донных отложениях, его потоки в атмосферу, к которым относятся диффузионный и пузырьковый перенос метана, а также дегазация в нижнем бьефе.

### **Методы исследования**

В ходе исследования были проведены многочисленные натурные наблюдения за изменчивостью потоков метана в атмосферу. Потоки измерялись с помощью метода «плавающих камер», широко признанного в научной литературе. Применялись расчетные методы для оценки компонентов эмиссии метана, такие как метод Thin Boundary Layer (TBL) для оценки диффузионного потока метана в атмосферу. Для полученных значений величин потоков с помощью натуральных экспериментов была оценена точность измерения удельных потоков метана методом камер, а также рассчитано оптимальное время постановки камеры при измерении потоков метана.

Все измерения УПМ сопровождалось зондированием водной толщи для получения распределения температуры и растворенного кислорода по глубине и определялись другие сопутствующие параметры. К ним относятся оценки продукционно-деструкционных процессов в водохранилище, анализ донных отложений для определения содержания в нем органического вещества, измерения обменных процессов на границе «донные отложения – вода» с помощью метода трубок «Кузнецова–Романенко». Также для расчета потока метана в атмосферу определялись метеорологические параметры на станциях измерений с помощью портативной метеостанции.

Помимо натуральных измерений, в работе применялись методы математического моделирования. Основной инструмент такого исследования – одномерная термогидродинамическая модель LAKE 3.2, разработанная В.М. Степаненко в НИВЦ МГУ. Модель предназначена для расчета термогидродинамики водоема, а также процессов биохимического цикла, в том числе цикла метана. В качестве атмосферного форсинга модели использовался реанализ ERA5-Land,

имеющий достаточное пространственно-временное разрешение в  $0.1^\circ$  координат и 1 час. Для адекватного применения модели к водохранилищам была использована версия с возможностью задания нескольких колонок донных отложений, чтобы более корректно воспроизводить сложную морфометрию искусственных водоемов. В работе модель использовалась для оценки чувствительности эмиссии метана к различным параметрам. При оценке эмиссии метана модель была откалибрована по результатам натурных измерений.

### **Научная новизна**

- Исследование пространственно-временной изменчивости удельных потоков метана и сопутствующих параметров водной экосистемы в течение многолетнего периода и обобщение результатов, полученных на Можайском, Озернинском, Иваньковском, Рыбинском, Бурейском водохранилищах. Создание базы данных на основании проведенных измерений.
- Детальное сравнение структуры удельных потоков метана из разнотипных водохранилищ России, выявление схожих черт и принципиальных отличий, анализ универсальных для всех водохранилищ факторов, определяющих эмиссию метана.
- Применение и улучшение динамической одномерной модели LAKE 3.2 для оценки годовой эмиссии метана из водохранилищ с детальной калибровкой температурного и биохимического циклов водоема на основании полученных натурных данных.
- Оценка эмиссии метана из Можайского, Озернинского, Иваньковского, Рыбинского и Бурейского водохранилищ с помощью комплексного использования натурных данных и математического моделирования была получена для исследуемых водоемов впервые.

### **Научная и практическая значимость результатов**

Подробное изучение пространственно-временной изменчивости удельных потоков метана в водохранилищах позволило выявить главенствующие факторы водной экосистемы, влияющие на величину годовой эмиссии метана в атмосферу. С помощью выявленных закономерностей возможна оптимизация кампаний натурных измерений на неизученных искусственных водоемах. Предложенный

комплексный подход, который включает в себя использование натуральных данных и математического моделирования, даст возможность получать наиболее достоверные оценки эмиссии метана из водохранилищ, а также в дальнейшем позволит проводить прогнозные оценки. Например, изучение отклика эмиссии метана из искусственных водоемов на тот или иной сценарий изменения климата с помощью методов математического моделирования.

### **Защищаемые положения диссертации**

1. Наиболее значимые выбросы метана из искусственных водоемов связаны с изменениями стратификации водной толщи. При наибольших выбросах доминирует пузырьковая составляющая потока метана в атмосферу.

2. Характерные величины удельного потока метана определяются водообменом и трофическим статусом водохранилища. Глубина является лимитирующим фактором, ограничивающим поток метана в атмосферу.

3. Наиболее чувствительные параметры для оценки эмиссии метана из водохранилищ при использовании термогидродинамического моделирования – интенсивность генерации метана в донных отложениях и зависимость скорости генерации от температуры воды. Удельный поток метана в модели наиболее чувствителен к изменению атмосферного давления и уровня воды в водохранилище.

4. Методика оценки годовой эмиссии метана с поверхности водохранилищ по данным полевых наблюдений и математического моделирования. Апробация методики на разнотипных водохранилищах РФ.

### **Личный вклад автора** состоит в следующем.

1. Участие в полевых работах на Можайском, Озернинском, Иваньковском и Рыбинском водохранилищах.

2. Анализ полученных результатов по натурным измерениям удельных потоков метана на исследуемых водоемах, выявление основных закономерностей пространственно-временной изменчивости эмиссии метана из водохранилищ.

3. Выявление ключевых факторов, определяющих величину эмиссии метана в атмосферу с разнотипных водохранилищ, статистический анализ полученных результатов полевых кампаний.



4. Оценка эмиссии метана по данным натуральных наблюдений для исследуемых водохранилищ. Использование как непосредственных результатов, полученных в ходе полевых кампаний на водохранилищах, так и метода аналогии для Озернинского водохранилища, где натуральных данных для непосредственной оценки временной изменчивости недостаточно. Оценка эмиссии метана с помощью модели LAKE 3.2 для исследуемых водохранилищ.

5. Разработка блока калибровки модели LAKE 3.2, который был встроен в модель и протестирован на исследуемых водных объектах. Дополнение модели новой схемой инициализации содержания метана в начальный момент времени, добавление в модель новой параметризации для расчета турбулентного обмена газов на границе «вода–атмосфера».

6. Проведение численных экспериментов для выявления наиболее чувствительных параметров при оценке эмиссии метана с помощью математического моделирования.

### **Публикации**

Автором опубликовано 12 статей по теме диссертации, в том числе 8 из них в журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.016.2 по специальности 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

### **Апробация результатов исследования**

Результаты работы были доложены на семинарах кафедры гидрологии суши и кафедры метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ 26.12.2023 и 19.03.2024 гг., а также многократно обсуждались на заседаниях Лаборатории Суперкомпьютерного моделирования природных и климатических процессов в НИВЦ МГУ в 2022–2024 гг. Кроме того, на основании полученных результатов были представлены устные и стендовые доклады на научных конференциях: ENVIROMIS 2024, г. Томск; V Виноградовские Чтения «Гидрология в эпоху перемен» 2023, г. Санкт-Петербург; CITES 2023, г. Москва; GREG 2022, г. Казань; ENVIROMIS 2022, г. Томск; VIII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» 2021, г. Пермь; IV Виноградовские Чтения «Гидрология от познания к мировоззрению» 2020, г. Санкт-Петербург; ENVIROMIS 2020, г. Томск.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, состоящего из 142 источников (из них 37 на русском языке и 105 на английском языке). Объем диссертации – 197 страниц, включает в себя 63 рисунков, 19 таблиц и 1 приложение.

## **Благодарности**

Автор выражает благодарность В.М. Степаненко за помощь в освоении модели LAKE 3.2 и ценные рекомендации и наставления при написании данной работы, сотрудникам Красновидовской УНБ Пуклакову В.В., Ериной О.Н., Соколову Д.И. за помощь в проведении полевых работ на Можайском водохранилище, сотрудникам ИВП РАН «Конаково» Федоровой Л.П., Григорьевой И.Л., Ломовой Д.В., Кременецкой Е.Р. за совместное сотрудничество при проведении работ на Ивановском водохранилище. Хотелось бы также выразить благодарность Фроловой Н.Л., Платонову С.В., Ефимову В.А., Сазонову А.В., Попрядухину А.А. за совместное участие в полевых работах на Рыбинском водохранилище. Отдельные благодарности автор выражает Горину С.Л., Агафоновой С.А., Терскому П.Н., Степаненко В.М. за любезное предоставление полевых результатов по Бурейскому водохранилищу, Репиной И.А. за ценные советы и комментарии по поводу полученных в диссертации результатов, а также Казанцеву В.С. за консультацию в методологических вопросах работы и помощи с лабораторным оборудованием.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. Метан, как элемент водной экосистемы. Основные составляющие баланса метана в водохранилищах**

**Глава 1** посвящена подробному описанию роли метана в экосистеме водохранилищ. Рассмотрены основные процессы, происходящие с метаном в водной экосистеме, а также приходные и расходные составляющие его баланса в водохранилище. Глава формирует фундаментальную теоретическую базу для дальнейшего исследования эмиссии метана из водохранилищ.

В **разделе 1.1** рассмотрен процесс анаэробного разложения органического вещества, как основной источник метана в водоемах суши [Федоров и др., 2005].

Показано, что генерация метана – сложный комплекс биохимических реакций, включающий в себя большое количество групп микроорганизмов. Проанализированы факторы, влияющие на интенсивность генерации метана в донных отложениях: содержание и состав органического вещества, температура среды, интенсивность процессов деструкции, осуществляемых разными группами микроорганизмов. Рассмотрены различные пути метаногенеза – ацетокластический и гидрогенотрофный, а также их соотношение, изменяющееся с глубиной донных отложений [Bazhin, 2003; Gruca-Rokosz and Tomaszek, 2015]. Ацетокластический путь преобладает в верхних слоях отложений, а гидрогенотрофный – в более глубоких. Проанализировано влияние затопления наземных экосистем при создании водохранилищ на процессы метаногенеза. В первые годы после наполнения водоема наблюдается интенсивная генерация метана за счет разложения затопленной растительности и почвенного органического вещества [Maesk et al., 2013; Tremblay et al., 2005]. Со временем этот эффект ослабевает, но может сохраняться повышенная эмиссия метана по сравнению с естественными водоемами.

В разделе 1.2 рассмотрены основные составляющие потока метана из водохранилищ в атмосферу. Диффузионный поток определяется градиентом концентрации метана между водой и атмосферой и зависит от метеорологических параметров (температура, скорость ветра, давление) [Cole and Caraco, 1998; Goldenfum et al., 2010]. Пузырьковый поток возникает при перенасыщении поровых вод донных отложений метаном и сильно зависит от гидростатического давления, а значит – от глубины водоема и атмосферного давления [Ostrovsky et al., 2008; Harrison et al., 2016]. Проанализирован процесс окисления метана в водной толще как важный фактор, определяющий величину эмиссии [Guerin and Abril, 2007; Reeburgh et al., 1993; Garkusha et al., 2016]. Интенсивность окисления зависит от концентрации кислорода в воде, температуры, численности метанотрофных микроорганизмов. В стратифицированных водоемах основная зона окисления метана располагается в области термоклина. Рассмотрена роль высшей водной растительности в транспорте метана. Макрофиты могут способствовать выходу метана из донных отложений, из-за этого он напрямую попадает в атмосферу, минуя зону окисления в водной толще [Joabsson et al., 1999; Milberg et al., 2017].

Этот поток может быть особенно важен для мелководных участков водохранилищ. Для водохранилищ большой вклад в эмиссию метана может вносить дегазация при сбросах воды в нижний бьеф водохранилищ [Kemenes et al., 2016]. Проанализированы особенности цикла метана в зимний период. Под ледовым покровом происходит накопление метана в воде, а также пузырьки метана могут аккумулироваться во льду [Spangenberg et al., 2020]. При вскрытии льда весной наблюдается интенсивный выброс накопленного метана в атмосферу.

В разделе 1.3 представлен обзор исследований эмиссии метана из водохранилищ в различных климатических зонах – от тропической до бореальной зоны. Проанализированы работы, проведенные в Бразилии, Французской Гвиане, США, Канаде, Китае, европейских странах [Dos Santos et al., 2006; Galy-Lacasaux et al., 1997; Mosher et al., 2015 и др.]. Показано, что наиболее интенсивно изучались тропические водохранилища. Проведен анализ состояния изученности эмиссии метана из водохранилищ России [Дзюбан, 2010; Fedorov et al., 2015; Федоров и др., 2024]. Показано, что, несмотря на наличие отдельных исследований (Волжские водохранилища, некоторые водохранилища Сибири, водохранилища южных регионов), в целом, данных недостаточно для надежной оценки вклада российских водохранилищ в глобальную эмиссию метана. Описаны некоторые закономерности пространственного распределения потоков метана в водохранилищах, рассмотренные в научных публикациях [Bastviken et al., 2008]. Показано, что максимальные потоки обычно наблюдаются в мелководных заливах и в зонах, в которых присутствует затопленная растительность. Минимальные потоки характерны для глубоких участков водохранилищ.

В разделе 1.4 представлен анализ эволюции подходов к оценке глобальной эмиссии метана из водохранилищ. Рассмотрены работы от первых оценок начала 2000-х годов [Louis et al., 2000] до современных исследований с использованием статистических методов и моделирования [Deemer et al., 2016; Johnson et al. 2021]. Большой разброс существующих оценок глобальной эмиссии метана из водохранилищ – от 4.8 до 104 Тг  $\text{CH}_4$  в год связан с ограниченностью и неравномерностью данных измерений, различиями в методологии оценок, неопределенности в определении вклада различных факторов, влияющих на эмиссию.

## Глава 2. Объекты и методы исследования

Глава посвящена описанию объектов исследования. В работе рассмотрены пять разнотипных водохранилищ России:

- Можайское – небольшое типичное, морфологически простое долинное водохранилище с большим количеством измерений. На водоеме проводились подробные исследования с 2016 по 2022 гг.;
- Озернинское – схоже с Можайским по многим параметрам, однако, на нем получены единичные данные о содержании и потоках метана. На водохранилище проводилась одна серия измерений УПМ;
- Ивановское – водохранилище с быстрым водообменом и большой антропогенной нагрузкой, хорошо изучено в течение многолетних съемок с 2020 по 2023 гг.;
- Рыбинское – самое большое по площади, имеющее сложную котловинно-долинную морфологическую структуру. Проведены несколько полевых съемок по измерениям удельных потоков метана в течение последних лет с 2021 года;
- Бурейское – наиболее удаленное водохранилище, расположенное на Дальнем Востоке. Самое глубокое из рассматриваемых. На водоеме проводилась серия полевых съемок с 2021 по 2023 гг.

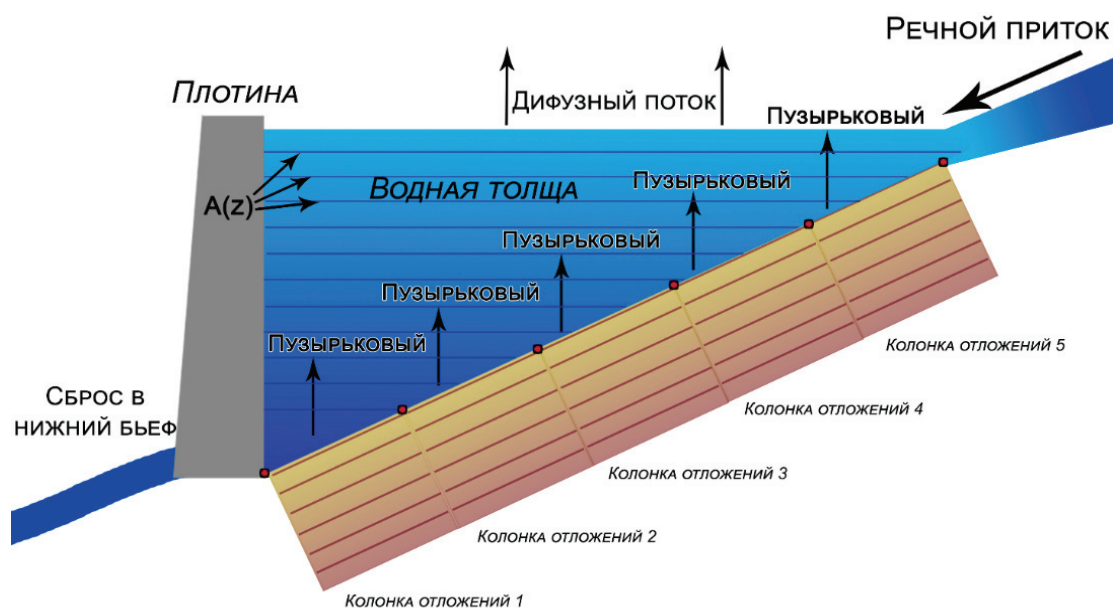
В главе подробно описываются методы натурных наблюдений, анализируются преимущества и ограничения используемых методов [Erkkila et al., 2018], оценивается их точность. Отдельный раздел посвящен описанию математической модели LAKE 3.2, используемой для расчета потоков метана.

В разделе 2.1 дана подробная характеристика пяти исследуемых водохранилищ. Показаны существенные различия между исследуемыми водоемами, которые определяются особенностями гидрологического режима, распределением температуры и растворенного кислорода, характером донных отложений и т.д.

В разделе 2.2 описаны методы натурных наблюдений за концентрациями метана и его потоками из водохранилища. Основной метод для определения потока метана с поверхности водохранилища, используемый в данной работе, это метод «плавающих камер», широко принятый в научном сообществе [Goldenfum et al., 2010;

Deemer et al., 2016; Bastviken et al., 2008; Trambly et al., 2005]. С помощью метода Thin Boundary Layer (TBL) [Cole and Caraco, 1998] рассчитывался диффузионный поток метана. Концентрация метана в воде определялась методом парофазной дегазации «Headspace» [Goldenfum et al., 2010]. В ходе исследования проводились сопутствующие измерения: зондирование водной толщи для получения распределения температуры и растворенного кислорода по глубине, измерение скорости продукционно-деструкционных процессов, отбор проб донных отложений, определение потока метана из донных отложений. Проведена оценка точности используемых методов измерения потоков и концентрации метана. Погрешность измерения удельных потоков метана в атмосферу составляет 27%, точность определения потоков из донных отложений – 56%.

В разделе 2.3 представлена общая структура модели LAKE 3.2, включающая блоки расчета термогидродинамики водоема и биогеохимических процессов в нем. Описана модификация модели для ее применения на водохранилищах, на которых характерна высокая пространственная неоднородность (Рис. 1).



**Рисунок 1.** Схема представления водной толщи и донных отложений в модели LAKE. Синими линиями схематично показаны горизонтальные сечения водоёма на расчетных уровнях модели, коричневыми столбцами изображены колонки донных отложений, расположенные на разных глубинах водоема

Описаны основные уравнения модели для расчета генерации, транспорта и окисления метана. Рассмотрены уравнения диффузии-реакции для метана в воде и донных отложениях, параметризация пузырькового потока, расчет окисления метана.

### **Глава 3. Пространственно-временная изменчивость удельных потоков метана из разнотипных водохранилищ**

В данной главе представлены результаты натуральных измерений потоков метана на исследуемых водохранилищах и их анализ. Для каждого водохранилища рассматривается пространственно-временная изменчивость потоков метана, выявляются основные закономерности и определяющие факторы. Проводится сравнительный анализ особенностей эмиссии метана из исследуемых водохранилищ. Особое внимание уделяется выявлению общих закономерностей и специфических черт, характерных для каждого водоема. На основе полученных данных проводится оценка общей эмиссии метана с поверхности исследуемых водохранилищ по натурным данным. Глава дает комплексное представление о характере эмиссии метана из разнотипных водохранилищ и факторах, ее определяющих.

В разделе 3.1 рассмотрено влияние метеорологических и гидрологических условий на формирование удельных потоков метана из исследуемых водохранилищ.

На Можайском водохранилище на основе многолетних наблюдений на рейдовой вертикали выявлен сезонный ход потоков метана. Показано, что минимальные потоки (менее  $20 \text{ мг C-CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ) наблюдаются в начале лета, после чего происходит постепенное увеличение до максимальных значений (до  $400 \text{ мг C-CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ) в конце августа – начале сентября. Обнаружена тесная связь изменчивости потоков метана с устойчивостью водной толщи. Резкое увеличение потоков происходит при быстрой смене стратификации при прохождении холодных атмосферных фронтов и в начале осеннего перемешивания. Этот эффект объясняется высвобождением метана, накопленного в гипolimнионе и в донных отложениях. Выявлено значительное влияние уровня воды на интенсивность эмиссии метана. На примере 2019 года с аномально низким уровнем показано, что

снижение уровня приводит к увеличению потоков метана. Это связано с уменьшением гидростатического давления и интенсификацией пузырькового потока. Проанализирована пространственная неоднородность потоков метана по акватории водохранилища. Максимальные потоки характерны для средней части водохранилища, где сочетаются оптимальные условия для генерации метана. Выявлена высокая межгодовая изменчивость потоков метана, связанная с различиями в гидрометеорологических условиях. Показано, что годы с устойчивой стратификацией характеризуются более высокими потоками в конце лета, в то время как годы с менее устойчивой стратификацией имеют более равномерное распределение потоков в течение летнего сезона.

Для Иваньковского водохранилища межгодовая изменчивость потоков метана связана с различиями в интенсивности водообмена водохранилища. В годы с высоким коэффициентом водообмена наблюдаются низкие удельные потоки метана. Обнаружены существенные различия в потоках метана между русловыми и пойменными участками водохранилища. На русловых участках потоки в среднем в 2–3 раза выше, чем на пойменных. Это связано с различиями в характере донных отложений и интенсивности деструкции органического вещества в них. Выявлена важная роль обособленных участков водохранилища (как, например, Шошинский плес) в общей эмиссии метана. В заливах, характеризующихся замедленным водообменом, потоки метана могут быть в несколько раз выше, чем на основной акватории. Выявлено влияние продукции органического вещества на интенсивность потоков метана – при более интенсивной продукции в донные отложения поступает более лабильное, легко разлагаемое органическое вещество, что способствует образованию метана. В Шошинском плесе измерены удельные потоки метана, значительно превышающие потоки с остальной акватории (более  $300 \text{ мг C-CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ), что связано с локальными источниками метана из-за затопленных торфяных отложений.

На Рыбинском водохранилище обнаружена высокая пространственная неоднородность потоков метана, связанная со сложной морфологией водоема. Эти различия в значительной степени определяются неравномерностью распределения содержания органического вещества в грунтах, а также влиянием впадающих



водотоков (например, река Чеснава). Максимальные потоки наблюдаются в районах с высоким содержанием органического вещества в донных отложениях (более 20%), минимальные – в зонах песчаных отложений. Синоптическая ситуация является важным фактором для формирования удельных потоков метана из Рыбинского водохранилища. На примере различия полевых съемок осенью 2021 и 2023 гг. показано, что при резком падении давления и более устойчивой предшествующей стратификации водоема могут наблюдаться большие выбросы метана (средний удельный поток метана осенью 2023 года составляет  $305 \text{ мг С-СН}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ), связанные с перемешиванием водной толщи и активным образованием пузырьков метана в донных отложениях. Такие осенние выбросы могут вносить существенный вклад в годовую эмиссию метана из водохранилища.

На Бурейском водохранилище преобладают низкие потоки метана по сравнению с другими исследованными водоемами. Средние значения потоков не превышают  $10\text{--}15 \text{ мг С-СН}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ , что связано с олиготрофным статусом водоема. Выявлена связь потоков метана с морфометрией разных районов водохранилища. Максимальные потоки характерны для мелководных заливов и верхней части водохранилища, минимальные – для глубоководных участков каньонной приплотинной части. Как и для других водохранилищ, показано влияние колебаний уровня воды на удельный поток метана. При низком уровне наблюдается увеличение потоков метана в 2–3 раза, особенно на мелководных участках. Обнаружено наличие локальных источников метана, связанных с особенностями почвогрунтов в ложе водоема, особенно в верхней части водохранилища, что может объяснять отдельные большие потоки, зафиксированные на водоеме, которые выделяются на фоне остальных измерений. Такие источники возможны на водоемах бореальной зоны [Walter et al., 2007], однако, генезис этих выбросов на Бурейском водохранилище на данный момент точно не определен.

На всех рассмотренных водохранилищах при высоких значениях потока метана в атмосферу доминирующую роль играет пузырьковая составляющая.

**В разделе 3.2** приведена общая сравнительная характеристика водохранилищ и полученные средние значения удельных потоков метана (Таблица 1).

**Таблица 1.** Среднее значение УПМ с водохранилища и глобальные характеристики водоемов

Водохранилище	Средний УПМ, мг С-СН <sub>4</sub> м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup>	Средняя глубина, м	Проточность, год <sup>-1</sup>	ОВ, %	Трофность
Можайское	91.9	7.00	1.78	11.4	Эвтрофное [Даценко, 2007]
Иваньковское	50.3	4.00	11.0	15.0	Эвтрофное [Mineeva, 2019]
Рыбинское	50.5	5.60	1.90	14.2	Эвтрофное [Korneva et al., 2019]
Бурейское	4.61	28.3	1.40	15.7	Олиготрофное [Сиротский, 2007]

- Одним из определяющих факторов величины удельных потоков метана из водохранилища является его трофический статус, так как именно он характеризует цикл органического вещества в водоеме, процессы его продукции и деструкции. Бурейское водохранилище отличается от остальных рассмотренных водоемов по этому критерию. Олиготрофный статус Бурейского водохранилища обусловлен как географическим положением и особенностями водосбора, так и морфометрией водоема – это глубокое каньонное водохранилище, среди прочих его выделяет самая большая средняя глубина. Для водохранилищ одного трофического статуса на распределение УПМ будут влиять более локальные факторы.

- Содержание органического вещества в донных отложениях не всегда является предиктором для сравнения удельных потоков метана между разными водоемами. Так как в любом из рассмотренных водоемов достаточно высокое содержания ОВ, в каждом из них достаточно субстрата для генерации метана, а на непосредственный процесс генерации влияют более динамичные, изменчивые параметры водной экосистемы. Содержание ОВ в грунтах может являться

решающим фактором в пространственном распределении УПМ в водоеме, или при сравнении водоемов, схожих между собой по остальным параметрам.

- Низкий средний удельный поток метана на Иваньковском водохранилище обусловлен высоким коэффициентом годового водообмена. В отличие от остальных водохранилищ, на Иваньковском водохранилище вода может обновляться чуть реже, чем раз в месяц, что во многом определяет его стратификацию и распределение кислорода по глубине, что непосредственно влияет на УПМ.

- Значения средних потоков метана из Рыбинского и Иваньковского водохранилища близки, однако, на Рыбинском водохранилище могут наблюдаться редкие большие выбросы метана. В остальном, схожие средние глубины (около 5 м), близкие величины содержания ОВ, а также схожие условия на водосборе этих водохранилищ приводят к близким средним значениям УПМ.

На основе анализа данных по всем исследованным водохранилищам выявлены основные факторы, определяющие интенсивность эмиссии метана: глубина, температура придонной воды, содержание кислорода в поверхностном слое, скорость деструкции органического вещества в донных отложениях. Влияние глубины на потоки метана имеет лимитирующий характер. Максимальные потоки наблюдаются при небольших глубинах, что связано с благоприятными условиями для образования пузырьков в донных отложениях, в то время как в глубоководных зонах (более 15–20 м) потоки невелики из-за большого гидростатического давления и увеличения вероятности окисления метана при подъеме через водную толщу. Для всех водохранилищ выявлена положительная связь между температурой придонной воды и удельными потоками метана, что связано с ускорением метаногенеза в донных отложениях. Обнаружена обратная зависимость между содержанием кислорода в поверхностном слое и диффузионным УПМ. При малой концентрации кислорода диффузионные потоки метана возрастают. Это связано с уменьшением интенсивности окисления метана при его транспорте через водную толщу. Для Можайского и Иваньковского водохранилищ, где проводились измерения интенсивности деструкционных процессов, выявлена тесная связь между скоростью деструкции органического вещества в донных отложениях и потоками метана в атмосферу.

В разделе 3.3 на основе данных натуральных измерений проведена оценка годовой эмиссии метана для Можайского водохранилища. Показано, что средняя годовая эмиссия составляет  $334 \text{ т С-СН}_4 \text{ год}^{-1}$ , с межгодовой изменчивостью от 265 до  $389 \text{ т С-СН}_4 \text{ год}^{-1}$ . Выявлено, что основной вклад в годовую эмиссию (60–70%) приходится на летний период, влияние дегазации метана при сбросах воды в нижний бьеф незначительно.

Применен метод аналогии для оценки эмиссии из Озернинского водохранилища. Можайское водохранилище может служить аналогом для Озернинского по морфометрическим и гидрологическим характеристикам. Получена оценка годовой эмиссии для Озернинского водохранилища за 2019 год:  $173 \text{ т С-СН}_4 \text{ год}^{-1}$ . Показано, что использование метода аналогии позволяет получить более надежную оценку по сравнению с простой экстраполяцией единичных измерений, рекомендованных IPCC, согласно 2 Уровню (Tier 2) оценки.

Проведена оценка суточной эмиссии метана из Ивановского и Рыбинского водохранилищ по результатам полевых съемок. Для Рыбинского водохранилища показано, что из-за большой площади поверхности водоема даже относительно невысокие удельные потоки приводят к значительной суммарной эмиссии. Обоснована необходимость комплексного подхода к оценке эмиссии метана из водохранилищ, сочетающего натурные наблюдения и математическое моделирование. Показано, что такой подход позволяет учесть сложную пространственно-временную изменчивость величин удельных потоков метана в атмосферу, которую невозможно охватить с помощью одних только полевых измерений.

#### **Глава 4. Использование математической модели LAKE 3.2 для оценки эмиссии метана из водохранилищ**

Глава посвящена описанию результатов применения математической модели LAKE 3.2 для расчета потоков метана и оценки его эмиссии из исследуемых водохранилищ. Рассматривается постановка цели и задач моделирования, описываются начальные и граничные условия, входные данные для модели. Особое внимание уделяется процессу калибровки модели по данным натуральных наблюдений и анализу чувствительности модели к различным параметрам. Представлены

результаты моделирования для Можайского, Иваньковского, Рыбинского и Бурейского водохранилищ: воспроизведение температурного и кислородного режима, динамики потоков метана. На основе результатов моделирования проводится оценка годовой эмиссии метана для каждого водохранилища с учетом различных составляющих потока и анализом неопределенностей. Моделирования Озернинского водохранилища не проводилось, так как по нему накоплено недостаточно натуральных данных.

В разделе 4.1 описана постановка задачи моделирования в рамках одномерного приближения. Описаны входные данные для модели. Основными метеорологическими параметрами являются: температура воздуха, атмосферное давление, влажность, скорость ветра, потоки солнечной радиации и осадки. В качестве источника этих данных выбран реанализ ERA5-Land. Также в модель подаются приток воды в водохранилище, расход через гидроузел, уровень воды. Описаны начальные условия модели. Для температуры воды и концентрации кислорода используются типичные вертикальные профили для начала расчетного периода. Для большинства других биохимических параметров начальные значения задаются близкими к нулю. Этим обосновано включение в модель периода разгона (spin-up) продолжительностью 1 год. Этого времени достаточно для выхода модели на квазистационарный режим и нивелирования влияния неточности начальных условий на результаты. Разработан и включен в код модели новый метод задания начального профиля метана в зависимости от константы генерации в донных отложениях.

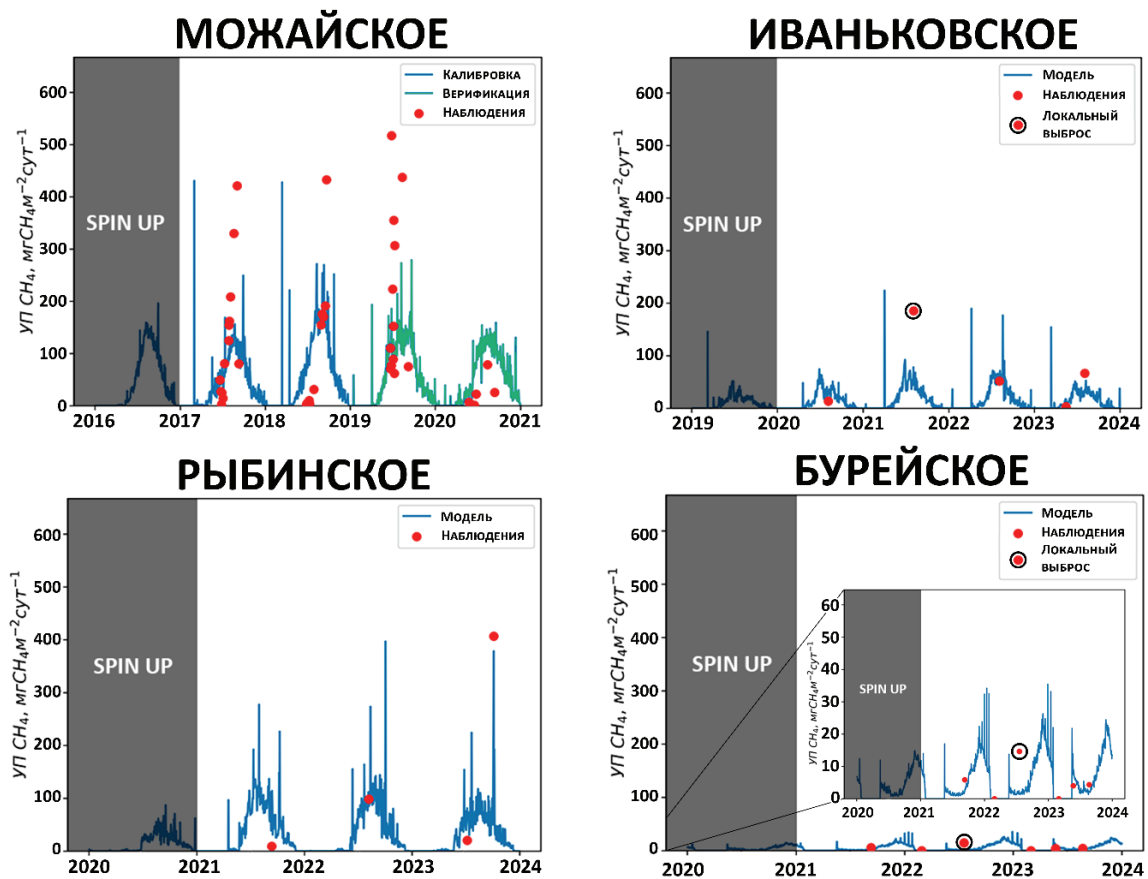
В разделе 4.2 проведен анализ чувствительности модели к различным параметрам. Методом Fourier amplitude sensitivity testing (FAST) выявлены наиболее значимые параметры, влияющие на результаты моделирования потоков метана. Наиболее чувствительными параметрами для потоков метана являются: коэффициент генерации метана в донных отложениях, температурный коэффициент метаногенеза. Также в итоговую калибровку включен параметр максимальной скорости окисления метана. Несмотря на низкую чувствительность, это эффективный параметр для регулирования диффузионной составляющей УПМ. Эксперименты с чувствительностью также показали, что эмиссия метана с поверхности водоемов практически не зависит в модели от притока метана в

водохранилище. Рассмотрено влияние изменений атмосферного давления и уровня воды на пузырьковый поток метана. Наибольшие выбросы в модели приурочены к изменению уровня режима, в то время как высокая амплитуда годового хода потока вызвана динамикой атмосферного давления. Разработана процедура калибровки модели, включающая три основных этапа: калибровка температурного режима, калибровка кислородного режима и калибровка удельных потоков метана. При таком подходе проводится калибровка величин, значимо влияющих на следующий шаг калибровки, но не оказывающих сильного влияния на предыдущие характеристики. В качестве метрик для оценки качества численных экспериментов были выбраны такие критерии, как среднеквадратичное отклонение (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE) и относительная ошибка модели.

В разделе 4.3 описаны результаты численных экспериментов по воспроизведению временного хода удельных потоков метана из исследуемых водохранилищ моделью LAKE 3.2. Представлены результаты моделирования термического и кислородного режима исследуемых водоемов. Модель хорошо воспроизводит основные черты стратификации водоемов, включая формирование и разрушение термоклина, формирование анаэробной зоны в гипolimнионе. По данным удельных потоков метана с Можайского водохранилища проведены калибровка и верификация модели LAKE, так как для него собрано наибольшее количество данных о временной изменчивости УПМ. За период калибровки модель воспроизводит динамику УПМ с относительной ошибкой, не превышающей погрешность измерения потоков на всех 4 водоемах (Рис. 2). Период верификации на Можайском водохранилище показал менее хорошую сходимость результатов модели и наблюдений, однако, близкую к погрешности измерений потоков (относительная ошибка модели составляет 30%, погрешность измерения потоков, оцененная в данной работе составляет 27%) (Рис. 2).

Модель адекватно воспроизводит сезонную динамику потоков, полученную по натурным данным, включая летнее увеличение потоков и осенние пики, связанные с разрушением стратификации. Кроме того, в модели удалось оценить величину весеннего выброса метана, что затруднительно сделать по натурным данным из-за сложной ледовой обстановки на водоемах в этот период. Тем не менее, модель LAKE на данный момент не может воспроизвести наибольшие

значения удельных потоков метана в Можайском водохранилище, хотя тренд на увеличение потоков в течение летнего периода воспроизведен. В настоящее время в конфигурации модели LAKE содержание органического вещества в донных отложениях задано постоянным значением. Блок динамического содержания органического вещества в грунтах в модели LAKE находится в разработке и его включение в модель выходит за рамки данной диссертационной работы. Также, в одномерной постановке невозможно учесть локальные выбросы метана, которые были измерены на Ивановском (влияние затопленных торфяных отложений в Шошинском плесе) и Бурейском (выбросы из-за особенностей почвогрунтов в ложе водоема) водохранилищах (Рис. 2).



**Рисунок 2.** Воспроизведение временного хода УПМ с исследуемых водохранилищ по результатам модели LAKE 3.2.

Проведена оценка вклада различных составляющих в общую эмиссию метана: диффузионного потока, пузырькового потока и дегазации метана при сбросах воды в нижний бьеф. Показано преобладание пузырькового потока в летний период на всех водоемах, кроме Бурейского водохранилища. Дегазация

оказывает заметное влияние на общую эмиссию метана только на Бурейском водохранилище, так как на нем наблюдаются самые низкие потоки метана, по сравнению с другими водоемами, а также водоводы на Бурейской ГЭС расположены на большой глубине, где вода может быть насыщена метаном из-за пониженного содержания кислорода. Соотношение вклада разных составляющих общего потока метана по результатам модели хорошо согласуется с данными наблюдений.

Для исследованных водохранилищ по результатам оценки с помощью модели LAKE 3.2 был получен доверительный интервал для годовой эмиссии метана. Он был оценен по уравнению регрессии между результатами численных экспериментов и инструментальных наблюдений. В качестве интервала неопределенности для результатов модели был выбран доверительный интервал для коэффициента наклона линии регрессии (уровень надежности  $\alpha = 0.95$ ). Y-пересечение в уравнении регрессии было задано 0, так как во время ледостава по данным наблюдений и в модели эмиссии метана не происходит. По результатам расчета модели LAKE 3.2 были оценены годовые значения эмиссии метана из исследованных водохранилищ, полученные для этих водоемов впервые (Табл. 2).

**Таблица 2.** Годовая эмиссия метана в углеродном эквиваленте с исследованных водохранилищ по результатам модели LAKE 3.2 за каждый год и средняя за весь период расчета

Водохранилище	Эмиссия метана в углеродном эквиваленте, тонн C-CH <sub>4</sub>				
	2017	2018	2019	2020	Средняя
Можайское	326 ± 83	416 ± 106	338 ± 86	396 ± 101	369 ± 94
Водохранилище	Эмиссия метана в углеродном эквиваленте, тонн C-CH <sub>4</sub>				
	2020	2021	2022	2023	Средняя
Иваньковское	1161 ± 1036	1517 ± 1354	1472 ± 1314	1142 ± 1019	1323 ± 1181
Рыбинское	НД	(28.3 ± 4.2) *10 <sup>3</sup>	(26.2 ± 3.9) *10 <sup>3</sup>	(24.8 ± 3.7) *10 <sup>3</sup>	(26.5 ± 3.9) *10 <sup>3</sup>
Бурейское	НД	921 ± 766	1224 ± 1025	1233 ± 1036	1126 ± 942



Сравнить полученные результаты оценки годовой эмиссии метана с оценками эмиссии по натурным данным возможно только по Можайскому водохранилищу. Величина годовой эмиссии по модели LAKE 3.2 сравнивалась с величиной годовой эмиссии метана по натурным данным из Можайского водохранилища за 2017 – 2019 гг., в которые накоплено наибольшее количество данных наблюдений. (Табл. 3).

**Таблица 3.** Оценка годовой эмиссии метана из Можайского водохранилища за период 2017–2019 гг. по результатам натуральных измерений и математической модели

Год	Эмиссия по модели LAKE 3.2, т C-CH <sub>4</sub>	Эмиссия по натурным данным, т C-CH <sub>4</sub>
2017	326 ± 83	347
2018	416 ± 106	265
2019	338 ± 86	389
Среднее	369 ± 94	334

Оценка эмиссии метана с Можайского водохранилища двумя способами – по натурным наблюдениям и с помощью математической модели LAKE 3.2 дает схожие результаты годового выброса метана. Модель LAKE 3.2 успешно выполняет свою задачу – с ее помощью возможна оценка годовой эмиссии метана из разнотипных водохранилищ на основании данных натуральных наблюдений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам данной работы можно сделать следующие выводы.

1. Удельные потоки метана из водохранилищ имеют значительную пространственно-временную изменчивость. Для Можайского водохранилища по данным регулярных полевых измерений было выявлено, что в течение летнего периода величина удельного потока метана увеличивается. Максимум потока метана наблюдается, как правило, в конце лета или начале осени, когда водоем переходит от стадии летней стратификации к осенней гомотермии. Интенсивность увеличения потока метана зависит от устойчивости водной толщи, которая определяется синоптической ситуацией. На примере 2019 года было показано, что

высокие значения потока метана могут быть связаны с низким уровнем водоема. Также в 2019 году было выявлено, что УП метана может значительно увеличиваться при резкой смене стратификации по причине погодных условий – наибольший поток метана 27.06.2019 ( $473 \text{ мг С-СН}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ) связан с резким падением давления и усилением ветра из-за прохождения мощного холодного фронта. Наиболее значительные выбросы метана происходят в виде пузырькового потока в атмосферу, при больших значениях УПМ доля пузырьковой составляющей может превышать 99% от общей эмиссии метана.

2. Удельные потоки метана сильно различаются по акватории водохранилищ. На Можайском водохранилище максимумы потоков метана характерны для средней части водоема (до  $400 \text{ мг С-СН}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ), где глубина (около 8–9 м) достаточна для возникновения устойчивой температурной стратификации в течение всего летнего периода и образования бескислородных условий, но не такая большая, как в низовьях водоема, где диффузионный поток метана в большей степени будет окислен при прохождении через водную толщу, а пузырьковый поток лимитируется гидростатическим давлением и большей растворимостью метана в донных отложениях. В верховьях водоема поток метана ограничивается постоянной аэрированностью водной толщи. Однако, высокие значения УПМ в этой части водоема (до  $420 \text{ мг С-СН}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ) могут быть связаны с аномально низким уровнем.

3. На Ивановском водохранилище ключевым фактором, определяющим межгодовую изменчивость удельных потоков метана, является интенсивность водообмена. Среди исследованных в работе водоемов, Ивановское водохранилище имеет самый высокий коэффициент годового водообмена – около  $11 \text{ год}^{-1}$ . В 2020 году, когда интенсивность водообмена за месяц была более  $1 \text{ мес}^{-1}$ , удельные потоки метана в Ивановском водохранилище были невелики и увеличивались от плотины к верховьям. В период других съемок высокие УПМ ( $200\text{--}300 \text{ мг С-СН}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ) наблюдались в средней части водохранилища. Интенсивность выбросов метана может быть связана со скоростью продукционно-деструкционных процессов в водохранилище, которые определяют поступление и разложение органического вещества в донных отложениях. Наименьшие УПМ (до

5 мг C-CH<sub>4</sub> м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>) были зафиксированы в мае 2023 года, так как в это время температура водоема была еще достаточно низка, а также свежее лабильное ОВ, которое служит субстратом для генерации метана, не успело аккумулироваться в донных отложениях. На пойменных участках Иваньковского водохранилища потоки метана в атмосферу ниже, чем над русловой ложбиной, что в данном случае может быть связано с низким содержанием ОВ (до 4%) в пойменных грунтах.

4. Удельные потоки метана из Рыбинского водохранилища могут быть крайне высокими на глубоководных станциях над затопленным руслом либо из-за повышенного содержания ОВ в грунтах, либо из-за формирования бескислородной зоны в придонных горизонтах, не характерной для Рыбинского водохранилища в летний период из-за постоянного перемешивания водной толщи. На примере этого водоема было показано, что в устьевых зонах притоков водохранилищ могут наблюдаться существенные выбросы метана, поэтому при оценках эмиссии с водохранилищ, зонам влияния притоков нужно уделять особое внимание. Наибольшие выбросы метана из Рыбинского водохранилища (около 980 мг C-CH<sub>4</sub> м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>) зафиксированы осенью 2023 года из-за сложившихся синоптических условий – падения давления и протяженного периода устойчивой летней стратификации.

5. На Бурейском водохранилище значения УПМ в течение всей полевой кампании были низкими (до 100 мг C-CH<sub>4</sub> м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>). Наибольшие потоки метана наблюдаются в более мелководных частях водохранилища – Малом море и Тырминском заливе. Самые большие потоки метана из Бурейского водохранилища были характерны для середины лета, и, возможно, могут объясняться условиями локальных метановых источников, связанных с особенностью почвогрунтов в ложе водоема, однако, этот вопрос требует более углубленного изучения. Кроме того, по результатам оценок диффузионного вклада в общий поток метана, в Бурейском водохранилище, в отличие от других водоемов, большая часть выбросов метана обусловлена диффузионной составляющей, на некоторых районах водохранилища вплоть до 100%.

6. Среди глобальных факторов, влияющих на поток метана из водохранилищ, важными показателями являются – интенсивность водообмена и трофический статус водоема. Содержание органического вещества в грунтах также

влияет на потоки метана в атмосферу, однако, не всегда имеет определяющее значение. Зачастую, различия в содержании ОВ нивелируются разной глубиной участков водоема. На УПМ влияют температура воды, определяющая скорость генерации метана, содержание растворенного кислорода в воде, определяющее интенсивность окисления, и скорость деструкции органического вещества. Были получены значимые связи между этими характеристиками и потоками метана. Важным лимитирующим фактором для УПМ в водохранилищах является глубина.

7. В ходе работы был разработан подход к моделированию удельных потоков метана из рассмотренных водохранилищ. С помощью модели LAKE 3.2, которая в процессе работы была усовершенствована (например, добавлен блок калибровки модели), были проведены численные эксперименты по анализу чувствительности результатов воспроизведения потоков метана к тем или иным параметрам модели. Самыми чувствительными параметрами оказались скорость генерации метана в донных отложениях и зависимость генерации от температуры воды. Также в ходе численных экспериментов выявлена чувствительность УПМ к колебаниям атмосферного давления и уровня воды.

8. В работе представлены различные методы оценки эмиссии метана из водохранилищ: расчет по натурным данным, применение метода аналогии, а также использование математического моделирования. В модели LAKE 3.2 на основе натурных наблюдений был получен временной ход удельных потоков метана за несколько лет из исследованных водохранилищ. Сравнение модельных результатов и натурных данных по температурному, кислородному режиму и по временной изменчивости УПМ показали хорошее соответствие. Модель успешно воспроизводит большую часть особенностей временного хода удельных потоков метана в течение года, а также соотношение пузырькового и диффузионного потоков.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных в п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова:**

1. **Ломов В.А.** Эмиссия метана с поверхности долинного Можайского водохранилища / Гречушникова М.Г., Репина И.А., Степаненко В.М., Казанцев В.С.,

Артамонов А.Ю., Ломов В.А. // География и природные ресурсы. 2019. № 3. С. 77–85. 1,04 п.л. ИФ РИНЦ = 0,58, доля участия 1/6. *Переводная версия*: **Lomov V.A.** Methane emission from the surface of the Mozhaisk valley-type Reservoir / Grechushnikova M.G., Repina I.A., Stepanenko V.M., Kazantsev V.S., Artamonov A.Yu., Lomov V.A. // Geography and Natural Resources. 2019. Vol. 40. № 3. P. 247–255. 1,04 п.л. SJR = 0.21, доля участия 1/6.

2. **Ломов В.А.** Сезонная и синоптическая изменчивость гидроэкологических характеристик слабопроточного долинного водохранилища / Гречушникова М.Г., Соколов Д.И., Ерина О.Н., Терешина М.А., Ломов В.А., Ефимова Л.Е. // Метеорология и гидрология. 2020. № 8. С. 92–101. 1,16 п.л. ИФ РИНЦ = 0.60, доля участия 1/6.

3. **Ломов В.А.** Результаты натурных измерений потока метана с разнотипных водохранилищ / Гречушникова М.Г., Репина И.А., Ломова Д.В., Ломов В.А. // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о земле. 2022. Т. 40. С. 3–13. 1,27 п.л. ИФ РИНЦ = 0.38, доля участия 1/4.

4. **Ломов В.А.** Численное моделирование временной изменчивости эмиссии метана из Можайского водохранилища / Степаненко В.М., Ломов В.А., Гречушникова М.Г. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т.15. № 4. С. 82–100. 2,19 п.л. SJR = 0.29, доля участия 1/3.

5. **Ломов В.А.** Натурные измерения эмиссии метана на крупнейших водохранилищах России в 2021 г. Начало масштабных исследований / Репина И.А., Терский П.Н., Горин С.Л., Агафонова С.А., Ахмерова Н.Д., Василенко А.Н., Гречушникова М.Г., Григорьев В.Ю., Казанцев В.С., Лисина А.А., Ломов В.А., Мишин Д.В., Сазонов А.А., Степаненко В.М., Соколов Д.И., Тимошенко А.А., Фролова Н.Л., Шестеркин В.П. // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 6. С. 713–718. 0,69 п.л. ИФ РИНЦ = 1,14, доля участия 1/18. *Переводная версия*: **Lomov V.A.** Field measurements of methane emission at largest reservoirs in Russia in 2021. The start of large-scale studies / Repina I.A., Terskii P.N., Gorin S.L., Agafonova S.A., Akhmerova N.D., Vasilenko A.N., Grechushnikova M.G., Grigor'ev V.Yu., Kazantsev V.S., Lisina A.A., Lomov V.A., Mishin D.V., Sazonov A.A., Stepanenko V.M., Sokolov D.I., Timoshenko A.A., Frolova N.L., Shesterkin V.P. // Water Resources. 2022. Vol. 49. № 6. P. 1003–1008. 0,69 п.л. SJR = 0.32, доля участия 1/18.

6. **Ломов В.А.** Пространственно-временные различия гидроэкологических характеристик Ивановского водохранилища в годы с различными погодными

условиями / Гречушникова М.Г., Ломова Д.В., Ломов В.А., Кременецкая Е.Р., Григорьева И.Л., Комиссаров А.Б., Федорова Л.П. // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 81–89. 1,04 п.л. ИФ РИНЦ = 1,14, доля участия 1/7. *Переводная версия:* **Lomov V.A.** Space and time variations of hydroenvironmental characteristics of the Ivankovo Reservoir in years with different weather conditions / Grechushnikova M.G., Lomova D.V., Lomov V.A., Kremenetskaya E.R., Grigor`eva I.L., Komissarov A.B., Fedorova L.P. // Water Resources. 2023. Vol. 50. № 1. P. 109–116. 0,92 п.л. SJR = 0.32, доля участия 1/7.

7. **Ломов В.А.** Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах / Репина И.А., Гречушникова М.Г., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Ломов В.А., Соколов Д.И., Степаненко В.М., Ефимов В.А., Мольков А.А., Капустин И.А. // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 899–913. 1,73 п.л. SJR = 0.22, доля участия 1/10.

8. **Lomov V.** Mechanistic modeling of the variability of methane emissions from an artificial reservoir / Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M., Repina I. // Water. 2024. Vol. 16. № 1, 76. 2,89 п.л. SJR = 0.72, доля участия 1/4.

**Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях и сборниках конференций:**

9. **Lomov V.** Reasons and patterns of spatio-temporal variability of methane emission from the Mozhaysk Reservoir in summer period / Lomov V., Grechushnikova M., Kazantsev V., Repina I. // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 163. P. 03010. 0,69 п.л. SJR = 0.18, доля участия = 1/4.

10. **Lomov V.** Methane fluxes in an artificial valley reservoir according to field observations and mathematical modeling / Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M., Repina I. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 611. P. 012029. 1,04 п.л. SJR = 0.20, доля участия = 1/4.

11. **Lomov V.** Methods for instrumental assessment of methane emission in reservoirs / Lomov V. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 834. № 1. P. 012032. 1,04 п.л. SJR = 0.20.

12. **Lomov V.** The role of background diffusivity and mean subsidence in the temperature stratification in the Mozhaysk reservoir according to the LAKE 2.3 model / Lomov V., Stepanenko V., Gladskikh D. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1023. № 1. P. 012013. 0,81 п.л. SJR = 0.20, доля участия = 1/3.