

УДК 556.047

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ И ПОТОКОВ МЕТАНА В РЫБИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В РАЗНЫЕ СЕЗОНЫ ГОДА

© 2024 г. В. А. Ломов^{a,b,c,*}, Н. Л. Фролова^{a,b}, В. А. Ефимов^{a,b}, И. А. Репина^{a,c}, Ли Чже^d, Янг Лю^d

^aИнститут физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Пыжёвский переулок, 3, Москва, 119017 Россия

^bМосковский государственный университет им. М. В. Ломоносова, географический факультет,
Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия

^cНИВЦ МГУ, Лаборатория Суперкомпьютерного моделирования природно-климатических процессов,
д. 1, стр. 4, Москва, 119234 Россия

^dЧунцинский институт зеленых и интеллектуальных технологий, Китайская академия наук,
266 Fangzheng Avenue, Chongqing, 400714 China

e-mail: lomson620@mail.ru

Поступила в редакцию 05.03.2023 г.

После доработки 20.04.2024 г.

Принята к публикации 29.05.2024 г.

Исследовано формирование потоков метана в Рыбинском водохранилище, а также изменчивость его содержания в воде на основе несколько полевых кампаний на водоеме в разные сезоны. Рыбинское водохранилище — очень крупное, относительно мелководное, слабопроточное, мезотрофно-эвтрофное, морфологически сложное котловинно-долинное водохранилище многолетнего регулирования стока, созданное на Верхней Волге в 1941 г. Всего выполнен отбор проб воды и воздуха на 71 станциях для определения концентрации метана, который совмещался с зондированием водной толщи. В результате была создана сеть опорных станций, на которых производятся регулярные измерения, а также дополнительные станции на акватории и в устьях рек. Для контроля отбиралась проба воды на гидроагрегатах ГЭС, а также ниже плотины Шекснинской ГЭС в черте г. Рыбинск. В целом для Рыбинского водохранилища характерны относительно невысокие концентрации метана — на большинстве станций среднее содержание растворенного в воде CH_4 не превышает 20 мкл/л. Наименьшие концентрации наблюдались в зимний период. Потоки метана с поверхности Рыбинского водохранилища варьируют в пределах от 4 до 718 $\text{мгС}-\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$. Удельные потоки (УП) в измеренные летний период больше, чем измеренные осенью, также летом пространственная изменчивость измеренных потоков более значительна. Значения потоков зависят от стратификации водоема, содержания кислорода в воде, органического вещества в донных отложениях и других факторов. Дегазация метана через плотину существенно меньше потоков с поверхности.

Ключевые слова: метан, удельные потоки метана, содержание метана в воде, водохранилище

DOI: 10.31857/S0002351524040101 EDN: JGUJWI

ВВЕДЕНИЕ

До 20-го века основными источниками парниковых газов с открытой водной поверхности были естественные реки, озера и болота, которые играют важную роль в глобальном углеродном цикле [Dean, 1998; Cole et al., 2007]. Развитие промышленности и городского строительства в последнее столетие привело к возникновению большого количества искусственных водоемов, создаваемых как для нужд энергетики, так и для водоснабжения городов. Оценкам общего поступления метана в атмосферу с водных объектов суши посвящено большое количество отечественных и зарубежных работ, например, [Федоров и др., 2005;

Tremblay et al., 2005; Cash et al., 2010; Tortajada et al., 2012; Li and Zhang, 2014; Deemer et al., 2016; Rosentreter et al., 2021]. Согласно докладу IPCC за 2021 г. вклад пресных водоемов в эмиссию метана в атмосферу составляет около 23% от всех источников [Masson-Delmotte et al., 2021].

Появление обширных искусственных водоемов, естественно, внесло вклад в изменение общего углеродного баланса [Tranvik et al., 2009; Tremblay et al., 2005]. Прежде всего это касается роли водохранилищ как источника поступления метана в атмосферу. В комплексе с другими биохимическими элементами концентрация метана может служить индикатором протекания

внутриводоемных биогеохимических процессов и экологического состояния водных экосистем [Федоров и др., 2004, 2005; Fedorov et al., 2015]. При этом общий вклад водохранилищ в эмиссию метана значительно различается по оценкам различных исследований [Li and Zhang, 2014; Deemer et al., 2016; Tremblay et al., 2005 и др.]. Как правило, в таких оценках используется экстраполяция значений эмиссии метана, полученных на одном водном объекте, на определенную территорию и даже климатическую зону. Данный подход не подходит для определения выбросов метана с конкретных водных объектов. Для более точных оценок выбросов метана с определенного водохранилища необходимо проводить ряд полевых наблюдений в разные сезоны года с целью определения временной изменчивости содержания и эмиссии метана. Несмотря на важность этой тематики и многочисленные исследования как гидрологического режима водохранилищ, так и их влияния на природные и климатические характеристики регионов, данных измерений удельного потока метана с отдельных водохранилищ, особенно всевозможных, мало. Из нескольких тысяч созданных водохранилищ данные фактических натуральных наблюдений имеются только по нескольким сотням [Rosentreter et al., 2021; Deemer et al., 2016]. Для оценки глобальной эмиссии применяются эмпирические закономерности, основанные на разных факторах, позволяющие лишь приблизительно оценить вклад водохранилищ в общую эмиссию метана. Наибольшее количество полевых наблюдений за концентрацией и эмиссией парниковых газов, в частности, метана, накоплено для водоемов Канады, США, Бразилии, Китая. В табл. 1 приведены сведения о концентрациях и потоках метана в 4 водохранилищах Китая, на которых были проведены наиболее детальные исследова-

ния пространственно-временной изменчивости УП метана.

Кроме того, в существующих обзорах и количественных оценках присутствуют сведения и об эмиссии с водохранилищ России, Индии, Юго-Восточной Азии, однако, в мировых базах данных информации о водных объектах этих регионов значительно меньше.

В России исследования водохранилищ как источника парниковых газов начались еще в середине прошлого века [Сорокин, 1960; Балабанова, 1961]. Среди работ российских исследователей необходимо отметить труды А. Н. Дзюбана [Дзюбан, 1998, 1999, 2002, 2004, 2010, 2011, 2012а, 2012б] по исследованию основных закономерностей цикла метана в донных отложениях разнотипных водоемов. Исследования, проводимые в Южном федеральном университете [Федоров и др., 2004, 2005; Fedorov et al., 2015; Гарькуша и Федоров, 2021] охватывают результаты лишь отдельных краткосрочных экспедиций на отдельных водохранилищах Юга России.

Международные исследования, проведенные на многих водохранилищах мира, также показали значительные различия в содержании и эмиссии парниковых газов [McCully, 2016] даже в пределах одной климатической зоны. Многочисленные зарубежные публикации приводят сведения о характерных значениях эмиссии парниковых газов с водохранилищ, классифицируя их преимущественно в соответствии с географическим положением, возрастом, трофическим статусом и морфологическим типом, например, в [Tranvik et al., 2009; Tremblay et al., 2005; Diem, 2016; Soum et al., 2004; Rosentreter et al., 2021]. Но для численного моделирования гидрохимического режима водоема необходимы сведения о пространственном и временном изменении как содержания растворенных газов в толще воды, так и их эмиссии,

Таблица 1. Сведения о концентрациях и УП метана на 4 водохранилищах Китая

Водный объект	Координаты		Площадь км ²	Климатическая зона	Концентрации метана, мкл/л			УП метана, мгС–СН ₄ м ² сут ⁻¹		
	N	E			Мин	Макс	Сред	Мин	Макс	Сред
Силоду (Xiluodu)	28.00	103.01	134	Умеренная	0.15	16.75	1.24	0.44	20.27	4.37
Сяцзяба (Xiajiaba)	28.01	104.01	95.6	Умеренная	0.02	16.88	1.72	0.88	9.74	3.78
Шицзитань (Shizitan)	29.91	107.25	65.6	Умеренная	0.43	4.37	1.75	1.19	28.24	6.69
Три ущелья (Three Gorges)	30.82	111.01	1084	Умеренная	0.18	117.1	4.69	0.15	147.02	13.34

и, что весьма важно, о гидрологическом режиме водоема и его взаимодействии с атмосферой.

Метан в водохранилище – это результат анаэробного разложения органического вещества в донных отложениях [Федоров и др., 2004, 2005]. Основные пути образования метана – гидрогенотрофный (когда метаногены используют в качестве восстановителя водород) и ацетокластический (метаногенами используются ацетат) [Graca-Rokosz and Tomaszek, 2016; Bazhin, 2003]. Он может попадать в атмосферу в виде двух основных составляющих потока – диффузионного и пузырькового. Диффузионный поток имеет низкую скорость и зависит в основном от разницы концентраций метана в соседних водных горизонтах. Кроме того, значительная его часть может быть окислена в водной толще при попадании в слой, насыщенный кислородом. При таких условиях до 90% диффузионного потока может быть окислено метанотрофными микроорганизмами [Guerin and Abril, 2007]. Пузырьковый поток возникает при перенасыщении воды или порового раствора донных отложений метаном [Miller et al., 2017]. Он быстрее достигает поверхности воды и менее подвержен окислению. Окисление может происходить при растворении пузырьков в воде [Ostrovsky et al., 2008]. Кроме того, на пузырьковый поток в значительной степени оказывает влияние давление – при резком изменении атмосферного или гидростатического давления (например, падение уровня воды в водохранилище при сбросах) пузырьковый поток может резко интенсифицироваться [Harrison et al., 2016].

Исследования масштабов эмиссии парниковых газов на акваториях водохранилищ проводятся с учетом как диффузионного, так и пузырькового потоков [Tremblay et al., 2005; Fedorov et al., 2015; Demarty et al., 2009]. В настоящее время за рубежом изучается вопрос о возможной дегазации при прохождении потока воды через турбины гидроэлектростанций и плотины (например, [Rosa and Schaeffer, 1994; Rudd et al., 1993; Fearnside, 2006]). Несмотря на значительное количество гидротехнических сооружений, подобные исследования в нашей стране практически отсутствуют.

В работе, посвященной влиянию водохранилищ на окружающую среду [Tortajada et al., 2012], проведена глобальная оценка эмиссии метана с поверхности водохранилищ мира по значени-

ям, полученным на основе полевых данных на 800 водных объектах, включая озера. Все эти водоемы разделялись на четыре основных типа по географическому положению: бореальный (или северный), умеренный, субтропический и тропический. После чего для оценки глобальной эмиссии метана с водохранилищ мира проводилась экстраполяция средних для каждого типа водоемов значений на все водохранилища, а далее выполнялся анализ полученных результатов распределения значений суммарной эмиссии в этих типах водоемов. Наибольшие значения эмиссии метана характерны для водохранилищ, расположенных ближе к экватору [Deemer et al., 2016; Bastviken et al., 2011; Tortajada et al., 2012; Deemer and Holgerson, 2021]. Это связано с более теплым климатом, благоприятным для развития метаногенных микроорганизмов – основных источников разложения органического вещества в донных отложениях при отсутствии кислорода и, как следствие, образованию метана и его накоплению в поровом растворе донных отложений и в толще воды при аноксидных условиях, что способствует интенсификации его потоков в атмосферу. Тем не менее, внутри каждой из четырех групп водохранилищ есть большой разброс в значениях. Например, измерения на Можайском водохранилище [Гречушникова и др., 2018], охватившие несколько сезонов, показали, что на слабопроточном мезотрофно-эвтрофном водохранилище умеренной зоны удельный поток метана близок к максимальным значениям для водоемов умеренной зоны по оценкам, представленным в работе, описанной выше [Tortajada et al., 2012] и имеет значительную межгодовую и межсезонную изменчивость. Связано это с тем, что на эмиссию метана влияет очень много других факторов (например, возраст водохранилища, проточность и др.), поэтому оценивать ее с хорошей точностью, опираясь только на данные о географическом положении, невозможно [Li and Zhang, 2014; Tremblay et al., 2005].

Кроме вертикальных потоков метана в водохранилищах возможны также и горизонтальный перенос – это приток метана с речными водами и выбросы метана при дегазации воды в нижний бьеф гидроузлов. Последнее особенно важно учитывать для больших водохранилищ, так как дегазация зависит от расхода воды через плотину. В глубоких водохранилищах тропического пояса с высоким коэффициентом водообмена дегаза-

ция может достигать 70% от общего потока метана в атмосферу [Kemenes et al., 2016].

Таким образом, формирование потоков метана в водохранилище, а также изменчивость его содержания в воде — достаточно комплексные процессы, на которые оказывают влияние многие факторы водной экосистемы и окружающей среды: температурный и кислородный режим, плотностная стратификация, синоптические условия, возраст и проточность водохранилища. Поэтому для более лучшего понимания годового цикла метана в водохранилищах необходимо провести несколько полевых кампаний на водоеме в разные сезоны. Такие измерения были проведены на Рыбинском водохранилище осенью 2021 г., зимой, весной и летом 2022 г., зимой 2023 г. Целью данной работы является выявление закономерностей динамики содержания метана в воде и оценка эмиссии метана с Рыбинского водохранилища в разные сезоны года.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рыбинское водохранилище — часть Волжско-Камского каскада водохранилищ, образовано плотиной Рыбинской ГЭС. Заполнение водохранилища до проектной отметки нормального подпорного уровня (НПУ) происходило достаточно долгий период, в 1941–1947 гг., что связано как с маловодным периодом стока Волги, так и условиями военного времени.

Водоохранилище создано на водораздельных территориях трёх крупных рек — Волги, Мологи и Шексны, что предопределило его основные морфолого-морфометрические параметры. Котловинно-долинное водохранилище является основным регулятором стока Верхней Волги (коэффициент регулирования 0,61), осуществляя неполное многолетнее регулирование стока.

Нормальный подпорный уровень (НПУ) и уровень мёртвого объёма (УМО) водохранилища составляют 102 м и 97,1 м соответственно. Полный объём при НПУ — 25420 млн м³, полезный объём — 16670 млн м³. Площадь зеркала водохранилища при НПУ и УМО — 4550 км² и 2385 км² соответственно. Длина 250 км (от Угличского до Шекснинского гидроузла); максимальная ширина 56 км; средняя глубина 5,6 м, максимальная 30,4 м; протяжённость береговой линии 2,47 тыс. км. Расстояние от г. Углича до г. Рыбинска по судовому ходу 112 км. Коэффициент водо-

обмена в разные по водности годы изменяется от 1,2 до 2,6 раз в год. Уровень колебаний воды в течение года до 4,9 м. Полезный объём Рыбинского водохранилища составляет ~0.4 среднего объёма притока за многолетний период. Он позволяет осуществлять многолетнее, сезонное, недельное и суточное регулирование в интересах различных водопользователей, а также обеспечение безопасности гидротехнических сооружений [Литвинов и Рошупко, 2007].

В период летне-осенней межени водные ресурсы водохранилища обеспечивают навигационные попуски в нижний бьеф и выполнение диспетчерского графика, соответствующего колебаниям нагрузки энергосистемы. Перед установлением ледостава по возможности не допускается повышение уровня воды в целях предотвращения захода рыбы на зимовку в осушенные летом мелководья. В зимний период водные ресурсы Рыбинского водохранилища используются в интересах энергосистемы, обеспечивая, в зависимости от ожидаемого объёма притока, регламентирующие уровни к началу половодья.

Основную роль в приходной части водного баланса Рыбинского водохранилища за анализируемый период играет поверхностный приток — 32,84 км³ (93,3%). Осадки на зеркало водохранилища составляют 2,35 км³ (6,7%). В расходной части сток через плотину и ГЭС составляет 32,73 км³ (95,48%), испарение — 1,55 км³ (4,5%) [Литвинов и Степанова, 2015].

Исследования концентрации метана в воде Рыбинского водохранилища и его притоков проводились и ранее. В первую очередь отметим работы А. Н. Дзюбана [Дзюбан, 1998, 1999, 2002, 2004, 2010, 2011, 2012а, б]. Им изучены процессы цикла CH₄ и деструкции органического вещества в донных отложениях на отдельных участках Рыбинского водохранилища. Он показал, что наибольшая концентрация характерна для р. Шексны в районе г. Череповец — 66 мкл CH₄/л, такие значения связаны скорее всего с антропогенным загрязнением Шексны. Здесь источник поступления CH₄ в водную массу — не только иловой метаногенез (автохтонный CH₄), но также хозяйственные, особенно нефтяные отходы (аллохтонный источник) [Дзюбан, 2011].

В притоках Рыбинского водохранилища, испытывающих слабое или умеренное загрязнение (например, р. Согожа, Ухра) содержание CH₄ не-

Таблица 2. Сроки проведения и количество станций наблюдений в ходе полевых кампаний на Рыбинском водохранилище

Сезон	Даты	Количество станций измерений
осень	12.09.2021–16.09.2021	14
зима	27.01.2022–5.02.2022	26
весна	31.03.2022–3.04.2022	11
лето	7.08.2022–12.08.2022	20

велико – 13–16 мклСН₄/л, но оно более высокое по сравнению с верхними и приплотинными участками водохранилища, что может быть объяснено активным осаждением здесь органических веществ, выносимых речными водами, к тому же, как правило, более насыщенных метаном.

В работе [Аверина и др., 2022] приведены результаты зимней студенческой экспедиции кафедры гидрологии суши МГУ, посвященной оценке общего содержания метана в Рыбинском водохранилище в зимний период и расчету отдельных составляющих баланса метана.

Изучение концентраций метана в водах Рыбинского Водоохранилища проводилось во время полевых выездов в разные сезоны года. Периоды их проведения указаны в табл. 2. Всего выполнен отбор проб воды и воздуха на 71 станции для определения концентрации метана, который совмещался с зондированием водной толщи и отбором проб донных отложений. В результате была создана сеть опорных станций, на которых производятся регулярные измерения, а также дополнительные станции на акватории и в устьях рек. Для контроля уровня дегазации при проходе воды через плотину отбираются пробы воды на гидроагрегатах ГЭС, а также ниже плотины Шекснинской ГЭС в черте г. Рыбинск (рис. 1).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Во время экспедиционных работ проводился отбор проб на содержание метана в толще воды, на ряде станций устанавливалась донная камера для определения потока метана на границе «донные отложения – вода». Концентрации метана в воде определялись по методу headspace [Gash et al., 2010]. Пробы отбирались в зависимости от температурной стратификации водной толщи на станции измерения. Основными горизонтами отбора были поверхность (0,5 м) и придонный горизонт (0,5 м ото дна). В ряде случаев отбирались пробы и на других глубинах. В зимний период особое внимание уделялось подледному го-

ризонту и особенностям накопления метана под льдом.

Попутно отбирались пробы донного грунта и пробы воды на содержание фосфора. Проводились измерения глубины, зимой – толщины льда, плотности и высоты снежного покрова на льду. Отбирались керны льда с их последующим описанием. В водной толще измерялись профили температуры, электропроводности, концентрации кислорода, рН. Для измерений использовались: кондуктометры YSIPro30, YSIProPlus, гидрологический зонд CastAway, а также оптический оксиметр YSIProODO и портативные рН-метры. Для анализа проб на биогенные элементы использовался полевой спектрофотометр Hannah hi83203.

Метеорологические данные во время работы на станции фиксировались с использованием портативной метеостанции.

Измерения удельных потоков метана проводились с помощью метода «плавающих камер» [Gash et al., 2010; Bastviken et al., 2011] (рис. 2). Время экспозиции составляло от 20 минут до 1 часа, для более точных результатов на станциях проводилось несколько повторностей измерения. При наличии ледяного покрова зимой 2022 и 2023 гг. были проведены эксперименты по определению потоков метана на границе «донные отложения – вода» с помощью донной камеры (рис. 1).

Принцип работы донной камеры аналогичен камерному методу для измерения потока с водной поверхности в атмосферу: проба воды из донной камеры отбиралась в начале и в конце эксперимента (время экспозиции донной камеры составляло около 1.5 часа), и по разнице концентраций определялся удельный поток метана из донных отложений.

Дегазация метана при сбросах воды в нижний бьеф рассчитывалась балансовым методом [Kemenes et al., 2016]. Разница концентрации метана в верхнем бьефе гидроузла и нижнем умноженная на расход воды принималась за величину выброса метана при дегазации.

Для определения концентрации метана в полученных пробах использовался газовый хроматограф Хроматэк-Кристалл 5000.2 производства ЗАО Хроматэк (г. Йошкар-Ола) с пламенно-ионизационным детектором. Определение содержания метана в каждой пробе проводилось в трех-

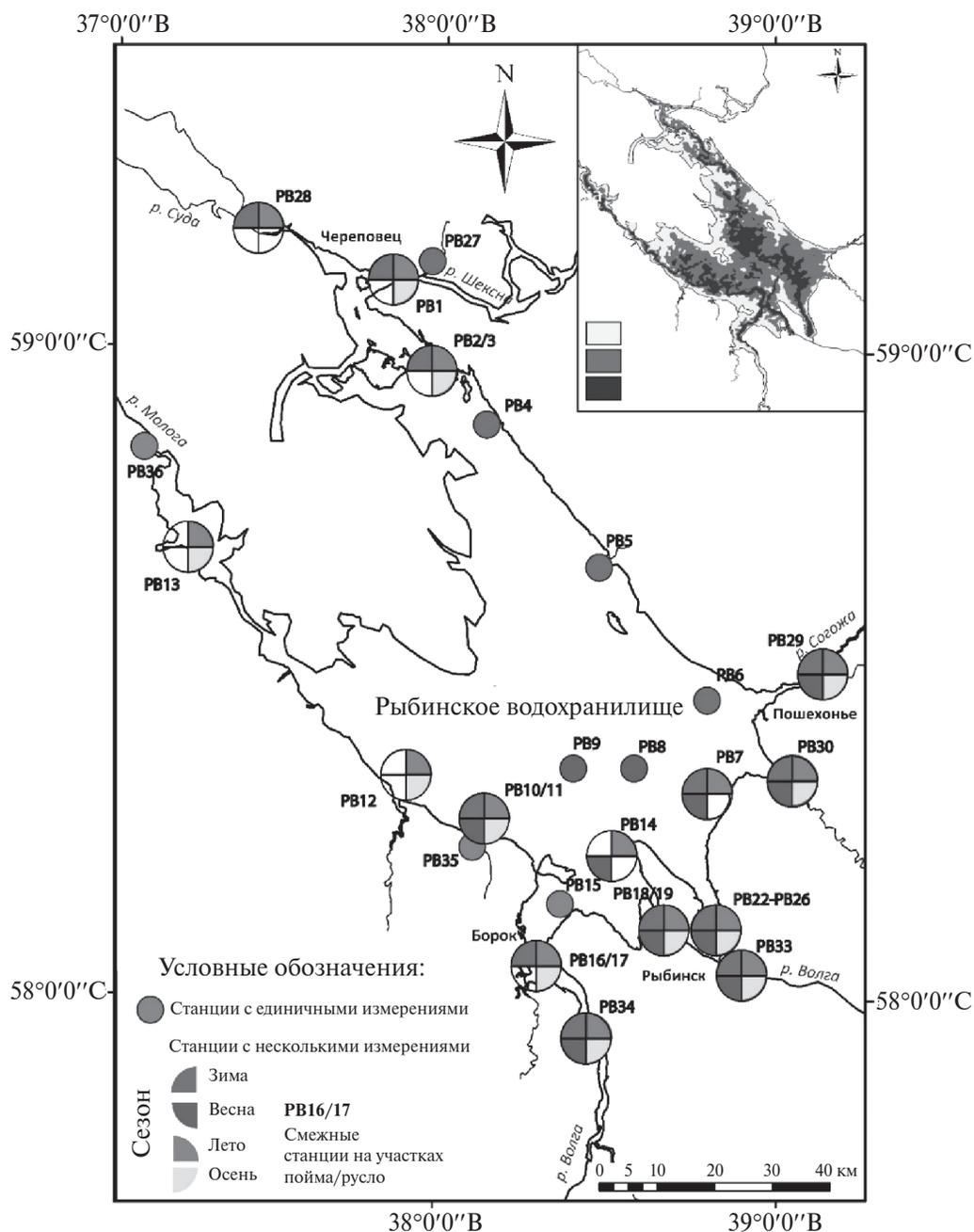


Рис. 1. Схема расположения станций пробоотбора на Рыбинском водохранилище в периоды экспедиций 2021–2022 гг. и зоны водохранилища с различными диапазонами глубин.

кратной повторности. Технические параметры хроматографа и условия проведения анализов, следующие: длина хроматографической колонки – 3 м, диаметр – 2 мм, температура пламенно-ионизационного детектора – 150 °С. Объем пробоотборника – 0,250 мл, объем 23 вводимой пробы газа – 3–4 мл. В качестве газа-носителя использовался азот (99,999% чистоты) с расходом 30 мл/мин. Расход водорода – 20 мл/мин, воздуха – 200 мл/мин. Для калибровки хроматографа использовались газовые смеси со следующи-

ми концентрациями метана: 0,49 ppm, 5,3 ppm, 10,3 ppm, 100 ppm и 1000 ppm.

Расчет концентрации метана в воде производился по следующей схеме: рассчитывалось парциальное давление метана в пробе (с учетом температуры воды и атмосферного давления при отборе проб), из которого вычиталось парциальное давление газа в воздушной пробе на той же станции. Затем находилось количество молей метана в отобранной пробе по уравнению идеального газа Менделеева-Клапейрона $n = PV/RT$. Для удобства анализа

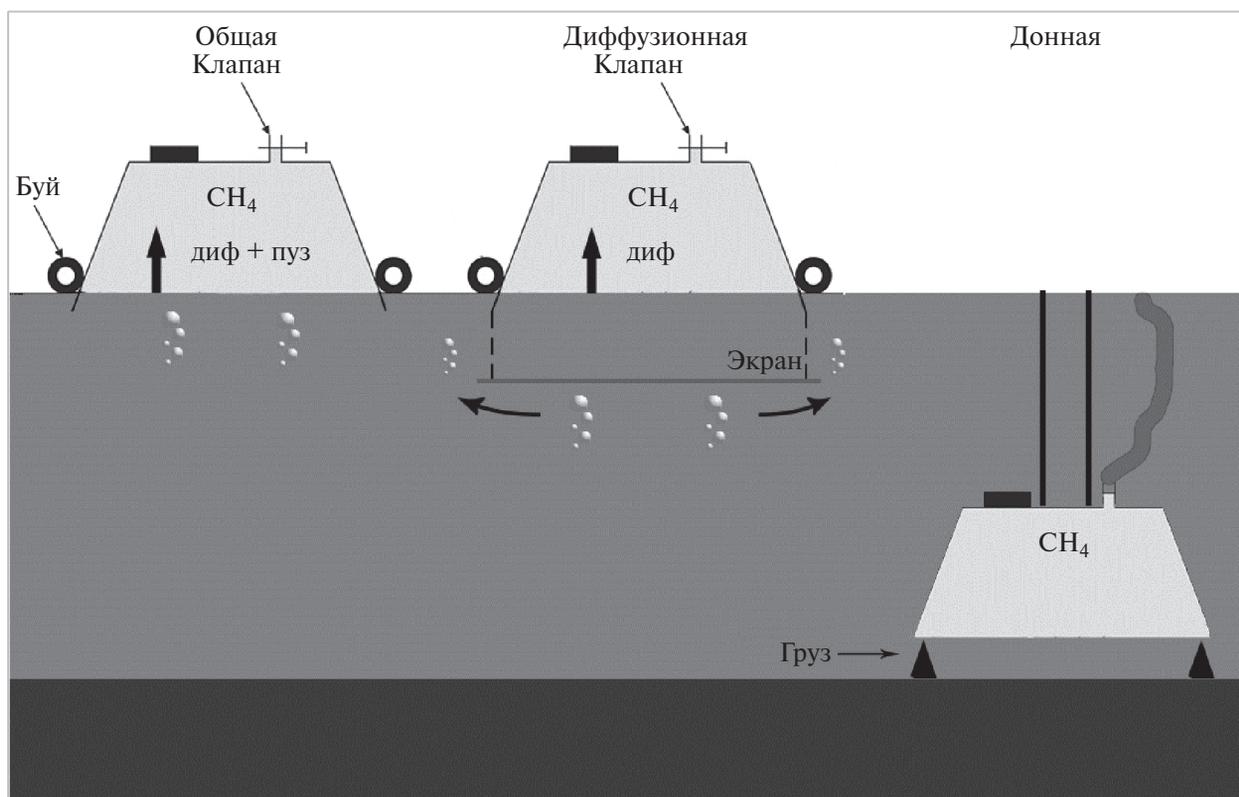


Рис. 2. Схема «плавающей камеры» для измерения удельного потока метана на границе «вода – атмосфера» и «донной камеры» для измерения удельных потоков метана на границе «донные отложения – вода».

помимо содержания метана в моль/литр, рассчитывалось содержание в мкл CH_4 /л, более распространенное при анализе концентраций метана.

Поток метана из донных отложений рассчитывался по разнице концентраций в начале и в конце экспозиции с учетом точного времени экспозиции донной камеры. Таким образом, был рассчитан поток метана в мгС– CH_4 /м² в сут, так как для сравнения потоков между собой часто используют именно пересчет на долю углерода в молекуле метана.

В ходе весенней полевой кампании была проведена оценка скорости окисления метана. Для этого помимо определения концентрации метана в воде на определенном горизонте, вода с этого же горизонта была отобрана в стеклянную склянку (объем 500 мл), после чего склянка была герметично закрыта. Отобранная проба была помещена в темный непрозрачный чехол, для исключения попадания солнечного света, а также в камеральных условиях хранилась в холодильнике при низкой температуре. Так были соблюдены условия, близкие к условиям в водохранилище в этот период. Время экспозиции такой пробы составляло около 1.5 суток, время наполнения и время снятия

пробы фиксировались с точностью до минуты. По истечению срока экспозиции вода из этой склянки отбиралась на содержание метана методом headspace, описанным выше. Также определялось содержание кислорода в склянке в начале и в конце эксперимента, так как оно было значительное (более 5 мг/л), генерацию метана в образце за время экспозиции можно считать нулевой, так как метан образуется в отсутствие кислорода. Таким образом, по разнице концентрации метана в момент отбора из водного горизонта и из склянки по окончании экспозиции, можно оценить скорость окисления метана в воде. Стоит отметить, что во избежание дополнительной погрешности определения скорости окисления, отбор пробы на содержание метана из водного горизонта и заполнение склянки для эксперимента проводились из одного батометра.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ЗА ПЕРИОД ПОЛЕВЫХ КАМПАНИЙ

Изменение уровней воды, притока и расхода за весь анализируемый период (сентябрь 2021 г. – февраль 2023 г.) по данным Русгидро приведено

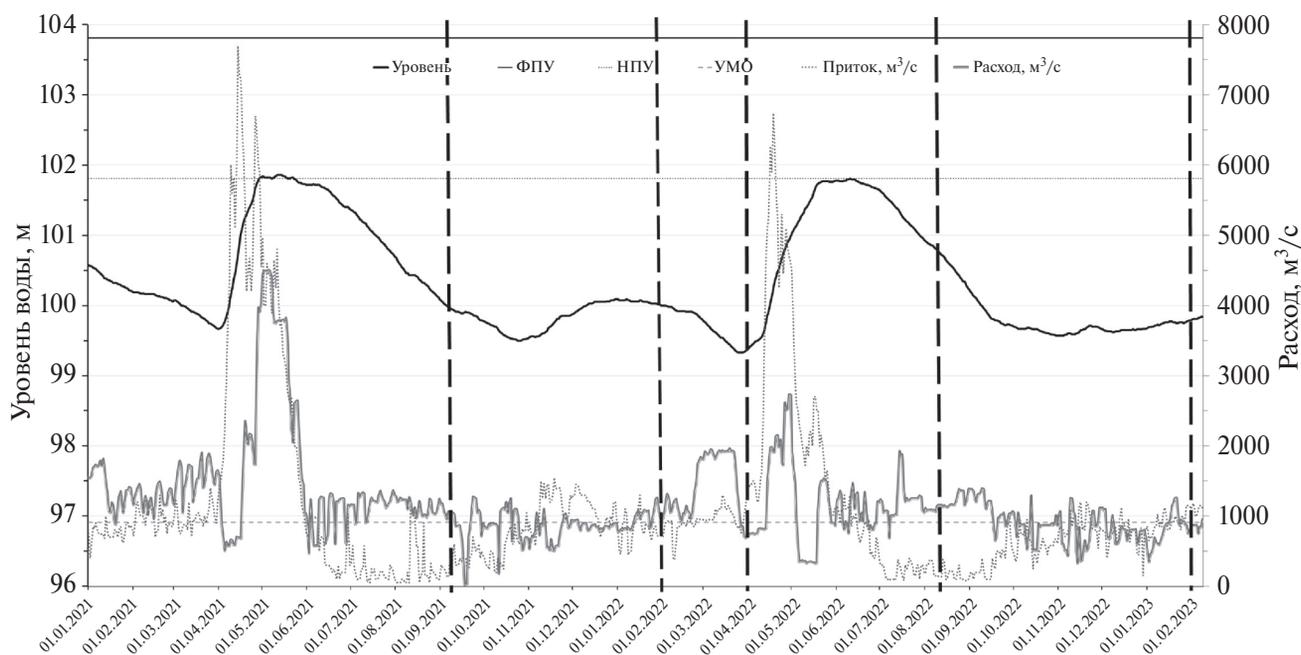


Рис. 3. Изменение уровня воды (м), притока ($\text{м}^3/\text{с}$) и расхода через плотину ($\text{м}^3/\text{с}$) (по данным [<http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/>]).

на рис. 3. Зимние съемки приурочены к периоду наибольшей сработки (особенно в конце марта 2022 г.). Наблюдения в августе 2022 г. соответствуют достаточно высокому положению уровня воды в водохранилище. Сравнение данных наблюдений за уровнем воды по посту Мякса за последние три года свидетельствуют о том, что режим уровней воды близок к среднеголетним условиям в период наполнения водохранилища и значительно большей (примерно на 0,5 м) сработки в летне-осенний и зимний период.

Во время осенней съемки в сентябре 2021 г. изменение температуры отражает общий характер охлаждения воды. Температура воды в водохранилище слабо меняется по акватории водоема и составляет $13,5^\circ\text{C}$ (в районе д. Вичелово), $14,1^\circ\text{C}$ в районе нижнего бьефа (Волга) до $11,7^\circ\text{C}$ в районе д. Прозорово. Температура по вертикали в водохранилище однородна на всех станциях.

В зимний период распределение температуры воды в Рыбинском водохранилище по глубине достаточно характерно для пресноводных водоемов бореальной зоны — на большинстве станций наблюдается выраженная обратная стратификация. Наиболее выраженная стратификация наблюдается на наиболее глубоких станциях со спокойным течением.

Летом для станций характерна прямая температурная стратификация, по-разному выраженная в различных частях водохранилища. На по-

верхности температура воды составляет $22\text{--}23^\circ\text{C}$, для глубоких станций в придонных слоях температура падает до 21°C , для более мелководных участков температура практически одинакова вследствие ветрового и волнового перемешивания.

Одной из важнейших гидрохимических характеристик любого водного объекта является содержание и изменение с глубиной концентрации растворенного кислорода. Кислородный режим Рыбинского водохранилища определяется как благоприятный на большей части её территории. Около 90% водной массы Рыбинского водохранилища круглый год обеспечены кислородом. Но при этом имеются места с пониженным его содержанием. Так, наиболее бедны кислородом в зимнее время волжский и моложский плёсы, а более насыщен — шекснинский. В район затопленного русла Мологи по мере сработки уровня поступают бедные кислородом болотные и грунтовые воды. Шекснинский участок Рыбинского водохранилища отличается более крупными размерами, меньшей заболоченностью и менее изрезанной береговой линией. В безлёдный период наименее обеспечен кислородом волжский плёс, содержание которого сильно зависит от вышележащего приплотинного участка. Характерные примеры распределения концентраций растворенного в воде кислорода на станциях различной глубины в летний период приведены на

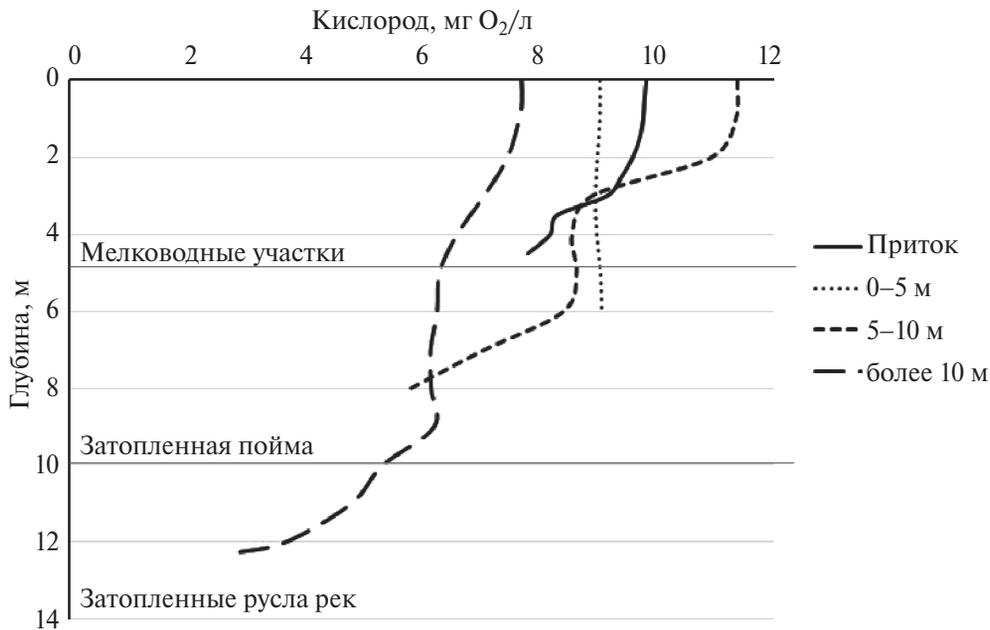


Рис. 4. Характерное распределение содержания кислорода в летний период 2022 г. на станциях различающихся по глубине зон Рыбинского водохранилища.

рис. 4. Летом 2022 г. в поверхностных слоях содержание растворенного кислорода максимально и часто превышает 100%, в дневные часы достигая 125–130%. С глубиной концентрация кислорода закономерно убывает и в придонных слоях составляет 60–70%. Часто концентрация кислорода слабо меняется с глубиной и составляет 80–90%. Но для ряда станций были обнаружены случаи дефицита кислорода в придонных слоях: как и весной это характерно для Волжского плеса и плеса в районе Весеьгонска.

Осенью 2021 г. распределение содержания растворенного кислорода по глубине и в пространстве было полностью однородно. Насыщение во всех точках составляет около 100%, а концентрация около 9–10 мг/л. Зимой на поверхности подо льдом, как правило, содержание кислорода довольно высокое – 80–90% и более, ко дну эта величина уменьшается до 40–60%. Основная часть кислорода к плотине поступает с волжским потоком, в то время как воды Шексны характеризуются несколько пониженным его содержанием.

В конце марта 2022 г. в поверхностных слоях на всех станциях содержание растворенного кислорода было около 100%. С глубиной его концентрация уменьшается примерно до 50–60%, в придонных слоях мощностью 1,5–2 м для глубоких станций он падает до 10–30%. Для большинства станций дефицит кислорода в придонных слоях отсутствует.

В качестве примера сезонных изменений рас-

пределения температуры и содержания кислорода на вертикали можно рассмотреть наиболее глубокие станции в Волжском плёсе (РВ18) и в районе д. Ивановское (РВ7). Обе станции находятся над затопленными руслами рек. Измерения на станции РВ18 производились во все рассматриваемые периоды, а в районе РВ7 весной, летом и зимой 2022 года.

Станция РВ18 является наиболее глубокой из рассматриваемых в рамках данного исследования. Она расположена над руслом р. Волга в 1 км от Волжской плотины и шлюзов Рыбинской ГЭС. Глубина в зависимости от уровня воды в водохранилище составила от 12 м зимой до 17,9 м летом. На станции могут отмечаться пониженные концентрации кислорода, вплоть до аноксии в летний период (рис. 5).

В зимний и весенний период содержание кислорода на станции составляет 70–90%-нас. по всей толще воды, что связано как с поздними сроками замерзания водохранилища, так и с наличием сбросов через гидротехнические сооружения и слабым потреблением кислорода гидробионтами. При этом, перед вскрытием содержание кислорода уменьшается на 10% относительно зимы. У дна (17–15 м) фиксируется дефицит кислорода – 10–30%-нас. (1–2 мгO₂/л), что может приводить к увеличению потока метана из донных отложений. В летний период концентрации кислорода уменьшаются и уменьшается растворимость из-за

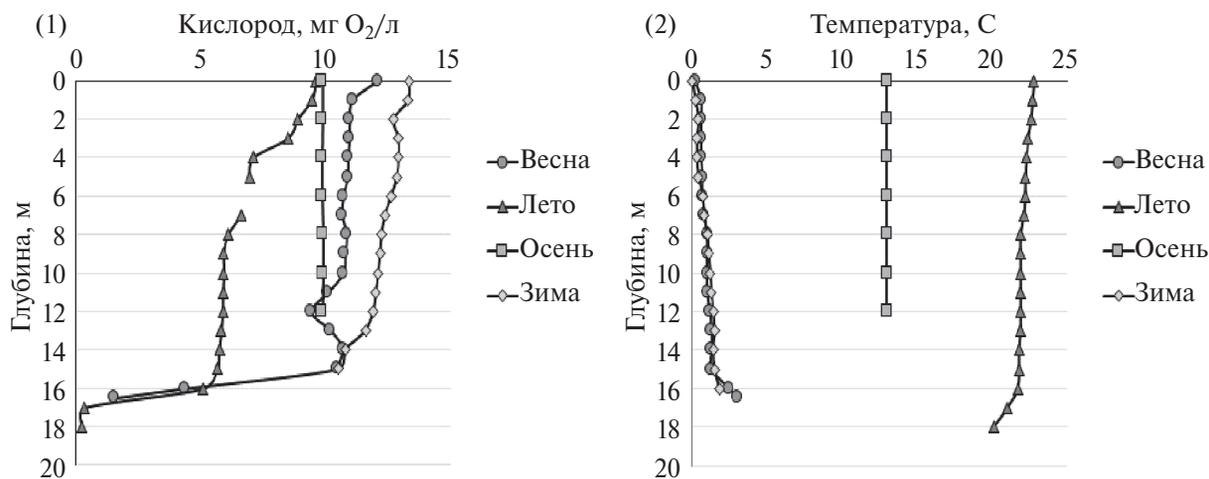


Рис. 5. Содержание растворённого в воде кислорода ($\text{mgO}_2/\text{л}$) (1) и температура воды ($^{\circ}\text{C}$) (2) на станции RB18

возрастания температуры. На станции формируется прямая температурная стратификация, слой температурного скачка размыт и находится на глубине 3–8 м. Здесь же происходит уменьшение концентрации кислорода с 97 до 70%-нас. В придонных слоях фиксируется аноксия из-за отсутствия перемешивания и интенсивного разложения органического вещества. При этом, на поверхности концентрации кислорода достигают 110%-нас. ($10 \text{ mgO}_2/\text{л}$) из-за развития фитопланктона. Во время осеннего перемешивания при зондировании концентрация кислорода составляет 93%-нас. ($9,8 \text{ mgO}_2/\text{л}$) во всех горизонтах.

Станция RB7, являющаяся репрезентативной для центральной части водохранилища, расположена над затопленным руслом р. Ухра в районе её впадения в р. Шексна. Глубины в районе станции находятся в диапазоне от 9 до 10,5 м в зависимости от уровня воды. Данная станция характеризует обширный участок водохранилища с глубинами более 10 м, расположенный в затопленных

долинах рек Шексна, Согожа и Ухра. Измерения на станции проводились в зимний, весенний и летний период 2022 г. (рис. 6).

В зимний и весенний период на станции наблюдается равномерное распределение концентраций кислорода до 5 (зимой) и 3 (весной) метров (менее 90%-нас.; $13,5\text{--}14 \text{ mgO}_2/\text{л}$). Это концентрации схожи с распределением кислорода на мелководных участках (глубиной менее 5 м) водохранилища. Ниже 5 м зимой происходит уменьшение концентрации до 50–70%-нас. (до $9 \text{ mgO}_2/\text{л}$) в результате поступления по русловой ложбине обеднённых кислородом грунтовых вод притоков р. Ухра. Перед весенним вскрытием концентрации кислорода в затопленном русле снижаются до 50%-нас (менее $7,5 \text{ mgO}_2/\text{л}$). В летний период концентрация кислорода также снижается из-за увеличения температуры. При этом, из-за ветрового перемешивания температура воды и концентрации практически не уменьшаются с глубиной. Слой температурного скачка выражен крайне

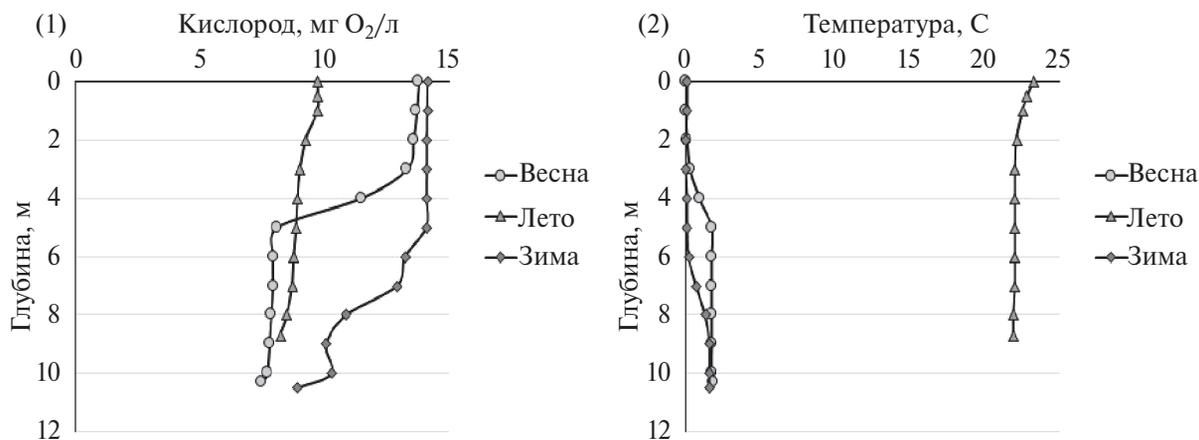


Рис. 6. Содержание растворённого в воде кислорода ($\text{mgO}_2/\text{л}$) (1) и температура воды ($^{\circ}\text{C}$) (2) на станции RB7.

слабо из-за малой глубины водоёма и местоположения станции в центральной части водохранилища. Цветение воды приводит к пресыщению поверхностных слоёв кислородом (113%-нас; 9,8 мгО₂/л). В придонных горизонтах концентрации составляют 93%-нас.

СОДЕРЖАНИЕ МЕТАНА В ВОДЕ

Рассмотрим изменчивость содержания метана в Рыбинском водохранилище в различные сезоны. На рис. 7 представлен график распределения средней по вертикали концентрации метана в воде на станциях измерений. В целом для Рыбинского водохранилища характерны относительно невысокие концентрации метана – на большинстве станций среднее содержание растворенного в воде СН₄ не превышает 20 мкл/л. Наименьшие концентрации наблюдались в зимний период. Это связано с невысокой интенсивностью потока метана из донных отложений из-за низких температур и насыщенности придонной воды кислородом. Удельный поток (УП) метана из донных отложений был измерен на трех станциях: РВ7, РВ11, РВ18 и наибольшее значение было измерено над затопленным руслом реки Ухра (РВ7), которое составило 7.55 мгСН₄/м² в сут. На двух других станциях УП не превышал 1 мгСН₄/м² в сут.

Кроме того, из-за достаточной аэрированности водной толщи, характерной для начала подледного периода водоема, происходит активное окисление метана. По этой причине накопление

метана в воде происходит очень медленно. Однако, как показали результаты измерений, метан может накапливаться в водной толще за период ледостава. Наиболее наглядно это проявляется на станциях РВ7, РВ11, РВ18, РВ34, где содержание метана в среднем по вертикали весной в несколько раз превышает зимнее содержание (рис. 8).

Наиболее интенсивное накопление метана происходит в подледном горизонте воды, так как выброс его в атмосферу невозможен. При этом для условия накопления метана необходимо, чтобы скорость его окисления была ниже, чем аккумуляция из-за поступления из донных отложений. Сравнение концентрации метана в подледном и придонном горизонтах на станциях измерений зимой и весной приведены на рис. 8.

Как можно видеть из графика, концентрации в весенний период (начало апреля) значительно больше, чем зимой (начало февраля). В зимний период значительной разницы между поверхностной и придонной концентрациями метана не наблюдается, наиболее значительные различия на станции РВ7. В весенний период на всех станциях кроме РВ18 содержание метана у дна ниже, чем в подледном горизонте воды. Метан, поступающий из донных отложений, успевает накапливаться под кромкой льда. Несмотря на активное окисление метана в воде (подробнее окисление метана будет рассмотрено ниже), его скорость ниже, чем интенсивность аккумуляции метана

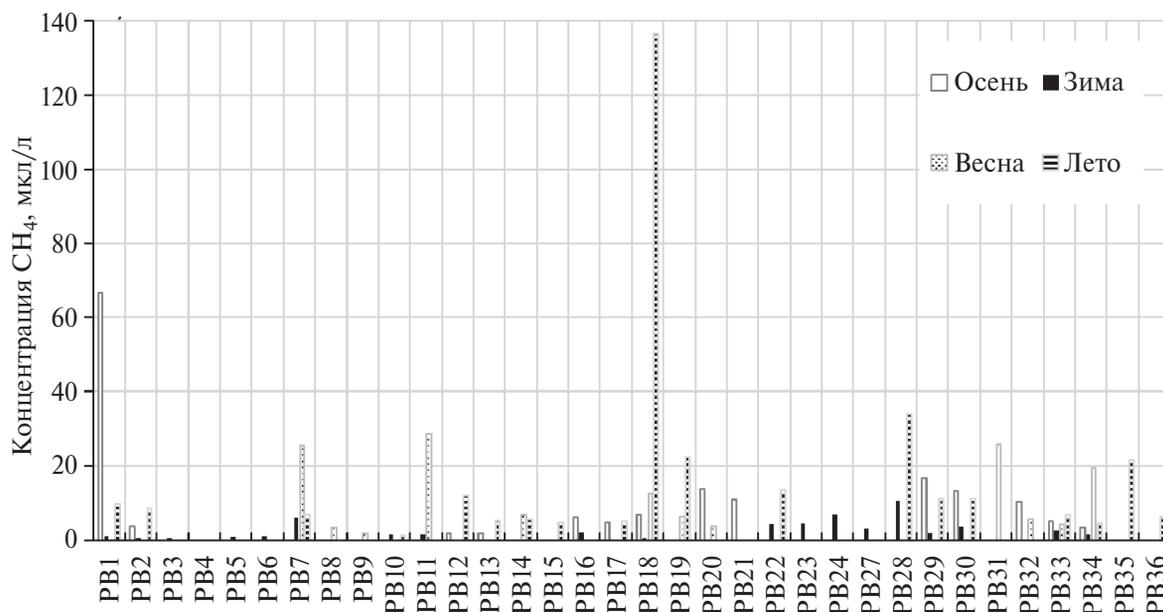


Рис. 7. Средняя по вертикали концентрация метана на станциях измерений за 4 полевых сезона на Рыбинском водохранилище.

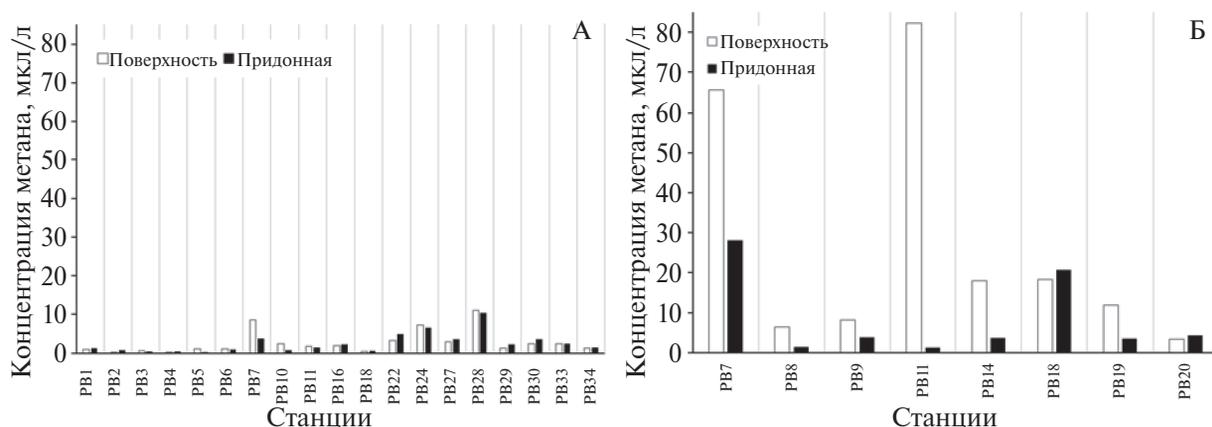


Рис. 8. Содержание метана на станциях измерений в поверхностном и придонном горизонтах в зимний (А) и весенний (Б) сезоны.

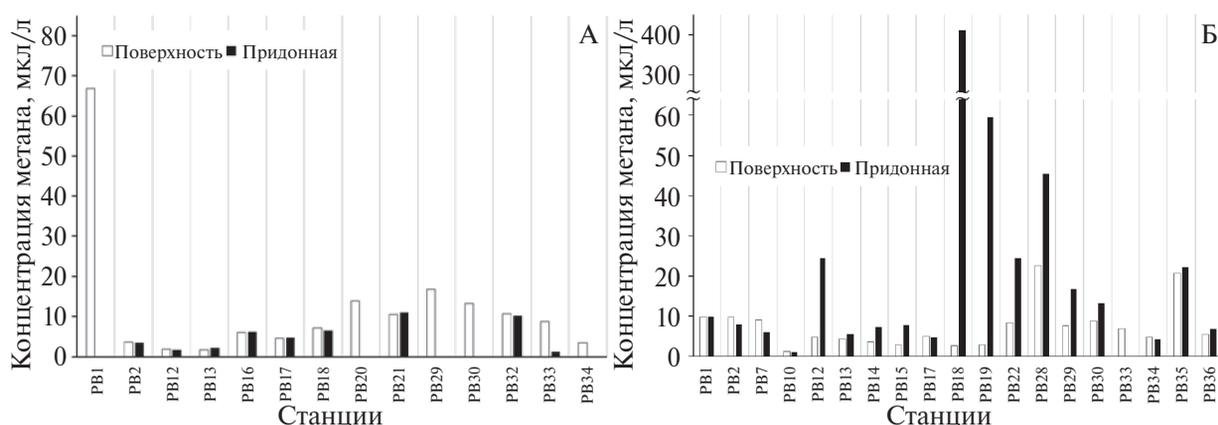


Рис. 9. Содержание метана на станциях измерений в поверхностном и придонном горизонтах в осенний (А) и летний (Б) сезоны.

подо льдом, однако, соотношение этого баланса зависит от очень многих факторов. Так, например, процесс окисления зимой лимитируется низкими температурами воды (в подледном горизонте они не превышают 0.2°C). Кроме того, важный фактор при этом – глубина станции, так как метан проходит большее расстояние от донных отложений к нижней кромке льда. Также, пузырьковый поток, который менее подвержен окислению, менее интенсивен на глубоких станциях. По этим причинам на наиболее глубокой станции PB18 (рис. 1) содержание метана в поверхностном горизонте близко к содержанию у дна.

Наибольшая концентрация метана подо льдом измерена весной на станции PB11. Также значительная концентрация метана в поверхностном горизонте наблюдалась на станции PB7. Обе станции расположены над затопленным руслом рек – Мологи и Шексны соответственно. Донные отложения в этих участках водоема имеют наиболее высокое содержание органического вещества

в грунтах, из-за этого генерация метана больше, чем на участках затопленных речных пойм. При более высокой интенсивности генерации, а также при глубине около 10 м, происходит активное образование пузырьков метана (наиболее активный пузырьковый поток характерен для глубин до 15 м [Harby and Overjordet, 2014], которые без окисления достигают нижней поверхности льда и растворяются в подледном горизонте.

Концентрации метана в воде по результатам измерений осенью 2021 г. на большинстве станций имеют однородное распределение по вертикальному профилю (рис. 9А).

Это связано с характерным для этого времени года перемешиванием и однородным распределением температуры по глубине. Из-за малой устойчивости водной толщи водохранилище легко подвергается перемешиванию, что приводит к выравниванию содержания растворенного метана по вертикали. Наибольшая концентрация (66.7 мкл/л у поверхности; измерений в при-

донном горизонте не проводилось) в осенний период наблюдается на станции РВ1 – верховья Шекснинского плеса (рис. 1). Высокое значение на этой станции может быть связано с локальным антропогенным влиянием – станция находится в черте г. Череповец. На остальных станциях содержание не превышает 20 мкл/л.

Станция РВ1 расположена в черте г. Череповец в русле р. Шексна (200 м ниже Октябрьского моста, у правого берега). Станция находится ниже впадения р. Ягроба, в устье которой расположены нефтебаза, Череповецкий речной порт, Череповецкий фанерно-мебельный комбинат, гаражные кооперативы. Выше по течению также находится большое количество СНТ. Во время экспедиций неоднократно был зафиксирован сброс неочищенных коммунально-бытовых и ливневых стоков в р. Ягробу. Низкое качество воды в реке и активное поступление органических веществ подтверждают результаты гидрологических съёмок 2022 и 2023 гг. Величины минерализации в р. Ягроба составляли 280–690 мг/л, а концентрации $P-PO_4$ в зимний и осенний период составляли более 1 мг/л, а содержание кислорода составляло 40–60%-нас. Из-за наличия подпора в устье реки происходит аккумуляция органического вещества и активная генерация метана по этой причине.

Насыщенные метаном воды р. Ягроба поступают в поверхностные слои р. Шексна, о чём свидетельствует повышенная минерализация в поверхностных слоях у правого берега ниже впадения реки. Метан также поступает в поверхностные слои вместе с водами притока. Наиболее интенсивно это происходит при северном направлении ветра, который приводит к сгону воды из устьевой области р. Ягробы. Дополнительным

фактором образования метана является рыбзавод, расположенный на правом берегу в районе станции пробоотбора и очистная водопроводная станция, расположенная выше по течению. Совместное воздействие этих факторов приводит к формированию высоких концентраций метана в поверхностных слоях станции РВ1 в осенний и зимний периоды.

УДЕЛЬНЫЕ ПОТОКИ МЕТАНА В АТМОСФЕРУ

Измерения удельных потоков (УП) метана на границе «вода – атмосфера» проводились в осеннюю и летнюю полевые кампании (рис. 10). Осеннюю потоки метана из Рыбинского водохранилища значительно различались в зависимости от расположения станций измерений (рис. 10А). Наибольшие потоки, измеренные на станциях РВ16, РВ18 и РВ21 (около $50 \text{ мгС}-\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$), характерны для приплотинного участка Рыбинского водохранилища. При этом, различия между значениями удельного потока в зависимости от глубины станции незначительны. Как было сказано выше, содержание кислорода в воде Рыбинского водохранилища осенью 2021 г. было повсеместно велико, также кислород был равномерно распределен на всех глубинах, аноксидных условий не наблюдалось. Кроме станций измерений в приплотинном плесе, по значениям удельных потоков метана можно сгруппировать станции РВ17 и РВ34. Эти станции расположены близко к месту впадения в Рыбинское водохранилище реки Волги. Станции РВ2, РВ12 и РВ13 расположены в центральной части акватории водохранилища, УП метана здесь незначителен (наибольший из них $10.8 \text{ мгС}-\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ на станции РВ2 – Шекснинский плес).

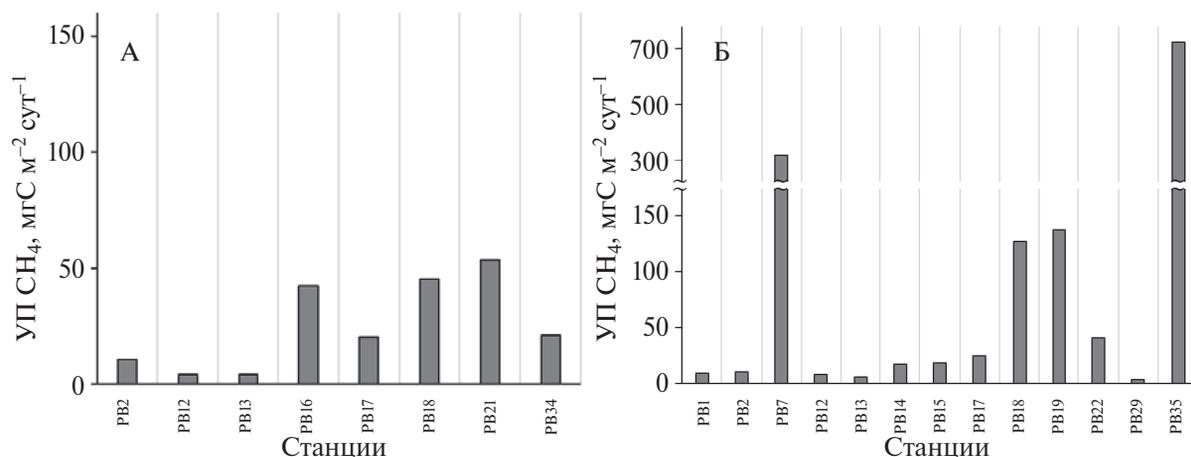


Рис. 10. Удельные потоки метана в атмосферу по результатам измерений осенью (А) и летом (Б).

В период летних измерений на Рыбинском водохранилище было охвачено больше станций (рис. 10Б). За исключением отдельных станций, УП метана невелики — до $25 \text{ мгС—CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ (станция РВ17). Также, как и для осеннего сезона, более существенные потоки метана на большинстве станций наблюдаются в приплотинном плесе. Особенно высоки значения потоков метана на станциях РВ18 и РВ19 (128 и $138 \text{ мгС—CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ соответственно), которые расположены в одном из наиболее глубоких мест Рыбинского водохранилища. Вызваны такие большие значения тем, что в этой зоне водохранилища в придонных горизонтах образовалась бескислородная зона, которая позволяет метану накапливаться в воде, не окисляясь. Наибольшие потоки в летний сезон были измерены на станциях РВ7 и РВ35. На станции РВ7, как уже отмечалось ранее, очень высоко содержание органического вещества в грунтах, что способствует генерации метана, а УП на станции РВ35 ($718 \text{ мгС—CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$) обусловлен влиянием реки Чеснавы, небольшого притока Рыбинского водохранилища (станция измерений находилась непосредственно в месте впадения водотока). Высокие значения УП в этом месте могут быть обусловлены особенностями водосбора реки, однако этот вопрос требует более подробного изучения.

Тенденция превышения потоков метана на границе «вода — атмосфера» характерна для водоемов умеренных широт. При устойчивой летней стратификации и образовании бескислородной зоны у дна поток метана возрастает в течение теплого периода, и достигает максимума в период начала осеннего перемешивания водоема. Более подробно изменчивость потоков метана в течение лета рассмотрена на Можайском водохранилище [Lomov et al., 2020]. Но для Можайского водохранилища характерна зависимость удельных потоков метана от глубины станции, чего не наблюдается на Рыбинском водохранилище. Это обусловлено его морфологическим строением — в отличие от долин-

ного Можайского водохранилища (как и большинства других водохранилищ) Рыбинское имеет котловинную форму чаши. Из-за этого эффекты ветро-волнового перемешивания сильно сказываются на перемешивании водной толщи и, как следствие, на температурном и кислородном режиме водного объекта — распределения температуры и кислорода в Рыбинском водохранилище в период открытой воды достаточно равномерны. По этой причине в течение осеннего и летнего сезонов измерений УП метана на большинстве станций невелики и имеют близкие значения, наиболее значимые потоки обусловлены локальными факторами (образование аноксии, влияние притоков или высокое содержание органического вещества в грунтах).

ДЕГАЗАЦИЯ МЕТАНА ЧЕРЕЗ ГИДРОАГРЕГАТЫ ГЭС

В ходе каждой полевой кампании на Рыбинском водохранилище помимо вертикальных потоков метана рассматривалась и его дегазация при сбросах воды в нижний бьеф гидроузлов. Помимо проб воды на содержание метана в верхнем и нижнем бьефах дополнительно зимой и весной были отобраны пробы воды внутри здания Рыбинской ГЭС в водоводах. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Зимой и весной концентрации метана в верхнем бьефе оказались ниже, чем в нижнем бьефе, что может быть связано как с погрешностью измерений (высокой при низких значениях концентраций), так и с особенностями забора воды из водохранилища. Для Рыбинской ГЭС характерен селективный водозабор — вода в водоводы может попадать с определенного диапазона горизонтов, соответственно сложно оценить среднюю концентрацию метана в воде на входе в водоводы. В таком случае более правильно использовать концентрацию метана непосредственно в водоводах, как концентрацию верхнего бьефа. Определение концентрации растворенных газов в водоводах плотины также имеет

Таблица 3. Расчет дегазации метана при сбросах воды в нижний бьеф гидроузлов (ВБ — верхний бьеф, НБ — нижний бьеф, ГУ — внутренние водоводы гидроузла)

Сезон	Даты измерения	Концентрации метана, мкл/л			Разница между ВБ и НБ, г/м ³	Расход воды, м ³ /с	Дегазация, тСН ₄ в сут
		ВБ	НБ	ГУ			
Осень 2021	14.09.2021	11.8	10.35	НД	0.001	865	0.08
Зима 2022	01.02.2022	1.4	2.04	2.44	0.0003	967	0.02
Весна 2022	01.04.2022	3.76	5.08	5.63	0.0004	720	0.02
Лето 2022	09.08.2022	13.44	7.01	НД	0.0046	1154	0.46

Таблица 4. Оценка скорости окисления метана в воде во время весенней кампании

Станция (горизонт отбора)	Начальная концентрация метана в воде, мкл/л	Скорость окисления, мкл/л в сут	Скорость окисления, % от содержания CH_4 в воде в сут
PB11 (6м)	2.67	1.14	43
PB18 (0м)	18.24	24.64	135
PB18 (16м)	20.54	16.74	81
PB20 (2.5м)	3.76	1.29	34

свои погрешности – из-за высокой турбулентности и возможной кавитации режим обмена газовой фазой между воздухом и водой может вносить ошибки при определении концентраций метана.

Дегазация при сбросах воды через гидроагрегаты Рыбинской ГЭС невелика – наиболее существенный выброс метана измерен летом – 0.46 тонн CH_4 в сутки, однако это величина незначительна по сравнению с выбросом метана с поверхности водоема.

ОБСУЖДЕНИЕ ОЦЕНКА ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА В ВОДНОЙ ТОЛЩЕ

Во время весенней полевой кампании была оценена скорость окисления метана в воде с помощью метода, описанного выше в данной статье. Скорость окисления определялась на станциях PB11, PB18 и PB20 на разных горизонтах. Результаты измерений представлены в табл. 4.

Интенсивность окисления метана достаточно сильно различается на разных станциях и на разных горизонтах. С точки зрения метанового баланса более наглядно выглядит сравнение относительного окисления метана – процент окисленного метана относительно содержания CH_4 в воде. Полученные значения относительной скорости окисления метана в целом хорошо совпадают с данными, приведенными в других статьях, посвященных этому процессу. В статье, где была проведена оценка окисления метана из озер центральной части Северной Америки, средняя относительная скорость окисления метана составляла 38% [Striegl et al., 1998]. В другой статье, где измерения проводились на водохранилище Petit-Saut, расположенном в тропическом климате, указывается, что окисление метана составляло около 85% от содержания метана в воде [Guerin and Abril, 2007].

Наиболее активная интенсивность окисления была получена в подледном горизонте на станции PB18 (Рис. 1). Что может быть связано с высокой концентрацией кислорода (12 мг/л), а более низкая скорость в придонном горизонте наоборот

лимитирована низким содержанием O_2 – 2 мг/л. При меньшем изначальном содержании метана в воде снижается и относительная скорость его окисления, что объясняется кинетикой данной реакции (уравнение Михаэлис-Ментен [Liikanen et al., 2002]).

Оценка окисления метана в подледный период – важная составляющая при расчете весенней дегазации при вскрытии ледового покрова. Отдельно оценки данного выброса в рамках работ на Рыбинском водохранилище не проводилась, однако, опробованный метод оценки окисления возможен для применения в такого рода расчетах.

ОЦЕНКА СУТОЧНОЙ ЭМИССИИ МЕТАНА С РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Опираясь на полученные значения удельных потоков метана в периоды открытой воды – осенью и летом была проведена оценка площадной суточной эмиссии метана с поверхности Рыбинского водохранилища. Значения удельных потоков метана осенью можно сгруппировать по их величинам в зависимости от морфологических участков водоема. Опираясь на информацию о батиметрии Рыбинского водохранилища, а также на его гидрологическую структуру были выделены 4 площадных района – Шекснинская акватория, Мологская акватория, приплотинный плес и участок подпора Волги (рис. 11).

Для каждого из участков была рассчитана величина среднего и медианного потоков, и на основе этих значений была оценена суточная эмиссия с каждого района (табл. 5).

Для осенних значений УП метана выбор основной статистической характеристики для оценки потока с каждого района не имеет большого значения, так как потоки в пределах районов различаются слабо. Общая эмиссия метана с поверхности Рыбинского водохранилища составляет 54–55 тС– CH_4 в сут.

Более значимые расхождения в определении площадной эмиссии метана в зависимости от выбора медианного или среднего значения на-

Таблица 5. Оценка суточной эмиссии метана с поверхности Рыбинского водохранилища по результатам осенней полевой кампании

Район	Площадь, м ²	Удельный поток метана, мгС–СН ₄ /м ² в сут		Эмиссия, тС–СН ₄ в сут	
		Средний	Медиана	По среднему	По медиане
Шекснинский плес	2322657579	10.8	10.9	25.0	25.3
Мологский плес	1230374120	4.2	4.7	5.2	5.8
Приплотинный	464697558	49.3	48.4	22.9	22.5
Подпор Волги	49059667	21.2	21.5	1.0	1.1
Сумма, тС–СН ₄ в сут				54.2	54.6

блюдаются по результатам расчета летней эмиссии. УП метана измеренные летом имеют гораздо большую пространственную неоднородность (рис. 12).

Особенно большие потоки наблюдаются на станциях РВ7 и РВ35. Станция РВ35 не учитывалась при расчете, так как большая величина потока в данном месте связана с локальным влиянием реки Чеснавы, расход которой очень мал, чтобы в значительной степени повлиять на эмиссию

с акватории Мологского плеса. Особенности УП метана на станции РВ7 были рассмотрены выше и значение, измеренное в данной точке, было принято во внимание при расчете площадной эмиссии. Результаты площадной оценки по летним измерениям представлены в табл. 6.

По результатам данной оценки видно, что использование медианы значительно занижает суммарную эмиссию метана, так как большие значения УП не влияют на общий результат. Однако,

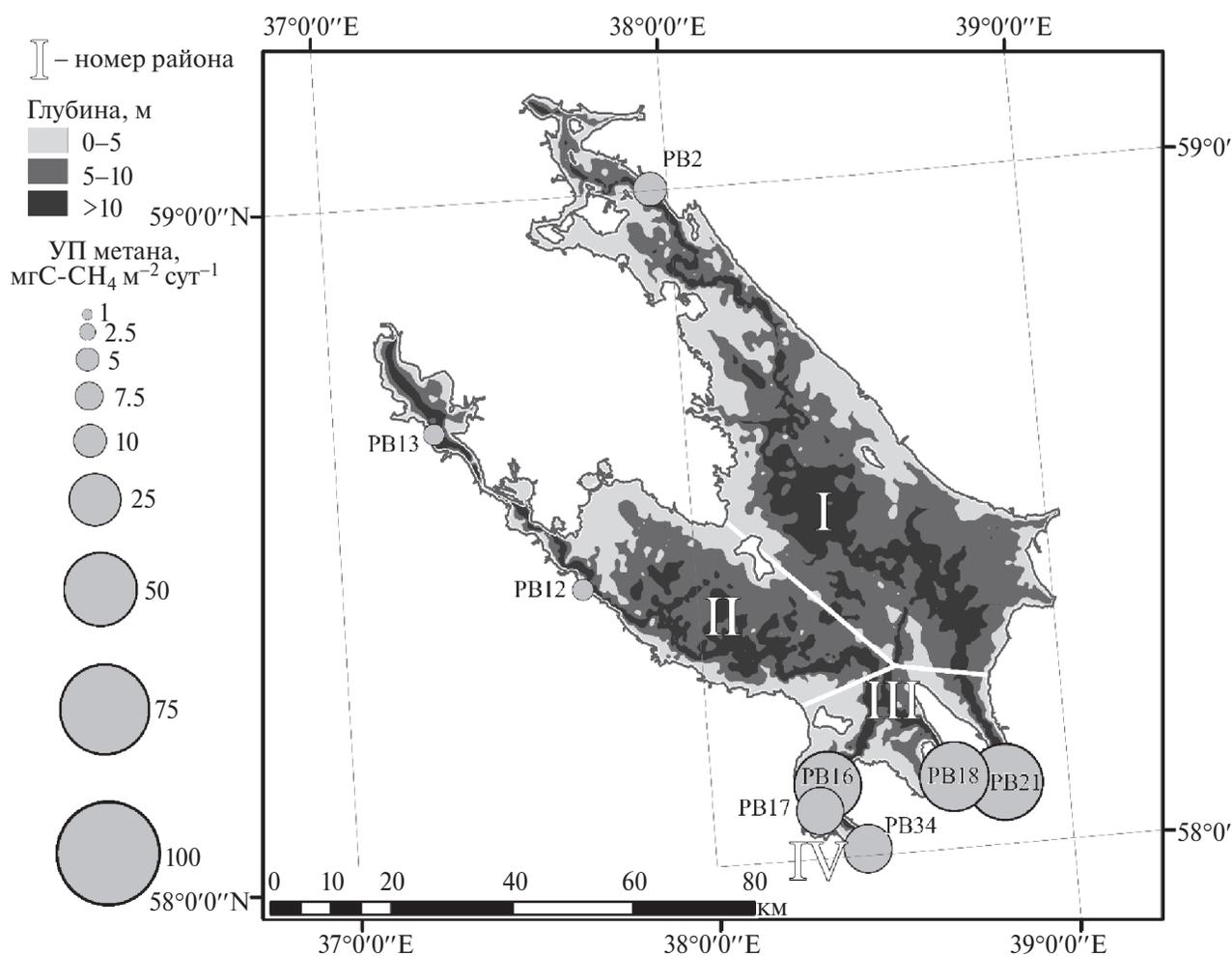


Рис. 11. Распределение удельных потоков метана с поверхности Рыбинского водохранилища, разделенного на 4 площадных района по результатам осенних полевых исследований.

Таблица 6. Оценка суточной эмиссии метана с поверхности Рыбинского водохранилища по результатам летней полевой кампании

Район	Площадь, м ²	Удельный поток метана, мгС–СН ₄ /м ² в сут		Эмиссия, тС–СН ₄ в сут	
		Средний	Медиана	по среднему	по медиане
Шекснинский плес (I)	2322657579	66.1	11.4	153.5	26.5
Мологский плес (II)	1230374120	7.1	7.1	8.7	8.7
Приплотинный (III)	464697558	64.9	31.8	30.2	14.8
Подпор Волги (IV)	49059667	25.6	20.3	1.3	1.0
Сумма, тС–СН ₄ в сут				193.6	51.0

стоит также отметить, что экстраполяция значений самых больших потоков (как в случае с PB7) на всю акваторию наоборот может приводить к завышению площадной эмиссии.

Таким образом, эмиссия метана с поверхности Рыбинского водохранилища по приведенным оценкам составляет 54.4 ± 0.2 тС–СН₄ в сут для осеннего периода 2021 года и 122.2 ± 71.3 тС–СН₄ в сут в зависимости от выбранного подхода к усреднению УП метана летом. Полученная

в данной работе оценка носит более методический характер, так как для более точных оценок необходимо большее количество измерений УП метана на акватории водоема и уточнения границ площадных районов. На примере осенних и летних сезонов с помощью данной оценки были показаны аспекты данного методического подхода и разница в полученных значениях при использовании разных статистических характеристик усреднения УП метана.

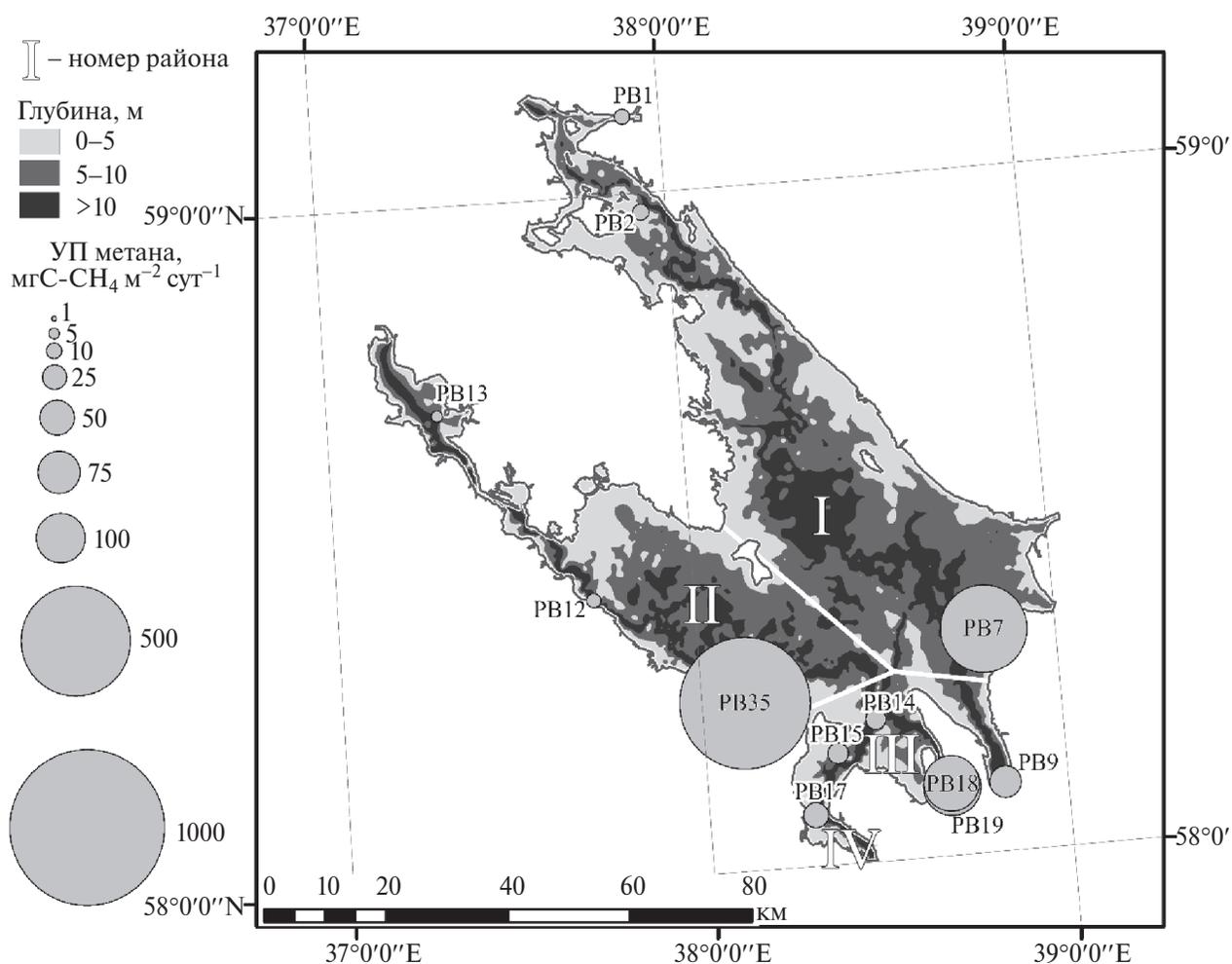


Рис. 12. Распределение удельных потоков метана с поверхности Рыбинского водохранилища, разделенного на 4 площадных района по результатам летней кампании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, содержание метана в Рыбинском водохранилище значительно изменяется между сезонами года. На примере сравнения зимних и весенних измерений было показано, что метан имеет тенденцию к накоплению в подледном горизонте, что обусловлено разницей притока метана из донных отложений и окислением метана в водной толще. На содержание метана в значительной степени оказывает влияние температурная стратификация водоема и зависящий от нее кислородный режим — при бескислородных условиях может происходить накопление метана в воде.

Потоки метана из Рыбинского водохранилища, измеренные осенью и летом имеют высокую пространственную неоднородность, обусловленную в первую очередь локальными факторами, такими как наличие бескислородных условий в придонных горизонтах воды, содержанием органического вещества в донных отложениях, влиянием притоков. Характерная для водохранилищ изменчивость удельного потока метана вдоль по продольному профилю не прослеживается на Рыбинском водохранилище из-за особенностей его морфометрического строения.

Постановка экспериментов для определения интенсивности окисления метана в водной толще показали, что несмотря на его высокую скорость, метан может накапливаться в подледных горизонтах за период ледостава.

По полученным значениям удельного потока метана с поверхности водохранилища была проведена оценка суточной эмиссии метана. На примере этой оценки были показаны способы экстраполяции значений потоков метана на станциях измерений на всю акваторию водохранилища. Значительное влияние на результат расчета суточной эмиссии метана из водохранилища оказывает выбор метода усреднения потоков — при использовании медианных значений не учитываются самые большие потоки, а при среднем значении влияние локальных максимумов потоков может быть наоборот слишком велико. Эмиссия метана с поверхности Рыбинского водохранилища по нашим оценкам составляет 54.4 ± 0.2 тС—СН₄ в сут для осеннего периода 2021 года и 122.2 ± 71.3 тС—СН₄ в сут в летний период в зависимости от выбранного подхода к усреднению. При сравнении по-

лученных результатов с приведенными в начале статьи данными о концентрациях и значениях УП метана с китайских водохранилищ, можно сделать вывод, что содержание метана и его потоки в атмосферу в Рыбинском водохранилище значительно больше — концентрации выше в 5–10 раз, УП больше в 10–20 раз. Расчет дегазации метана через гидроагрегаты Рыбинской ГЭС показали, что по сравнению с эмиссией с поверхности, выброс метана при сбросах воды незначителен.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Полевые исследования проведены в рамках договора с ПАО «Русгидро» 1010–416–2021. Методика мониторинга разработана при поддержке ВИП ГЗ «Российская система климатического мониторинга».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверина А. А., Антипов Н. Е., Виногоров А. А., Воловцов А. А., Головнин К. И., Кузнецов И. А., Овчинникова О. В., Петров Н. А., Полухин С. И., Сушинцев И. М., Хорошева А. С., Ефимов В. А., Ломов В. А., Фролова Н. Л.* Оценка общего содержания метана в Рыбинском водохранилище в зимний период и расчет отдельных составляющих баланса метана // В сб. Исследования молодых географов: сборник статей участников зимних студенческих экспедиций. М. 2022. С. 71–80.
- Балабанова З. М.* Гидрохимическая характеристика Камского водохранилища 1954–1959 // Тр. Уральского отд. ГосНИОРХ. 1961. Т. 5. С. 38–104.
- Гарькуша Д. Н., Фёдоров Ю. А.* Факторы формирования концентраций метана в водных экосистемах. Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2021. 366 с.
- Гречушников М. Г., Репина И. А., Степаненко В. М. и др.* Пространственно-временные изменения содержания и эмиссии метана в водохранилищах с различным коэффициентом водообмена // Известия Русского географического общества. 2018. Т. 150. № 5. С. 14–33.
- Дзюбан А. Н.* Метан и процессы его трансформации в воде некоторых притоков Рыбинского водохранилища // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 5. С. 571–576.
- Дзюбан А. Н.* Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: Принтхаус, 2010. 174 с.
- Дзюбан А. Н.* Метан в поверхностных водах как показатель их качества // Вода: химия и экология. 2012. № 7. С. 7–12.
- Дзюбан А. Н.* Метан и микробиологические процессы его трансформации в воде верхневолжских водохранилищ // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 1. С. 68–78.

- Дзюбан А. Н.* Микробиологические процессы круговорота органического вещества в донных отложениях водохранилищ Волжско-Камского каскада // Водные ресурсы. 1999. Т. 26. № 4. С. 262–271.
- Дзюбан А. Н.* Микробиологические процессы превращения метана и деструкция органического вещества в грунтах водохранилищ Волги и Камы // Гидробиол. журн. 2004. Т. 40. № 2. С. 72–77.
- Дзюбан А. Н.* Численность бактерий и процессы превращения метана в донных отложениях водохранилищ Волги и Камы // Микробиология. 1998. Т. 67. Вып. 4. С. 473–475.
- Дзюбан А. Н.* Экологические аспекты исследований содержания метана в природных водах // Вода: химия и экология. 2012. № 11. С. 10–15.
- Литвинов А. С., Рошупко В. Ф.* Многолетние и сезонные колебания уровня Рыбинского водохранилища и их роль в функционировании его экосистемы // Водные ресурсы. 2007. Том 34. № 1. С. 29–40.
- Литвинов А. С., Степанова И. Э.* Зависимость содержания органического вещества и биогенных элементов от гидрологических условий в Рыбинском водохранилище // Водное хозяйство России. 2015. № 3. С. 20–31.
- Сайт РусГидро. <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/>
- Сорокин Ю. И.* Метан и водород в воде волжских водохранилищ // Тр. Инст. Биол. Водохр. 1960. Т. 3. № 6. С. 50–58.
- Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С., Гарькуша Д. Н.* Метан как показатель экологического состояния пресноводных водоемов (на примере озер Валдай и Ужин) // Метеорология и гидрология. 2004. № 6. С. 88–96.
- Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С., Гарькуша Д. Н., Хорошевская В. О.* Метан в водных экосистемах. Ростов-на-Дону–Москва: Ростиздат, 2005. 329 с.
- Bastviken D., Tranvik L., Downing J., Crill P., Enrich-Prast A.* Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink // USA: Science. 2011. V. 331. P. 6013–6063.
- Bazhin N.* Methane Emission from Bottom Sediments // Chemistry for Sustainable Development. 2003. V. 11. P. 577–580.
- Cole J., Prairie Y.T., Caraco N.F. et al.* Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget // Ecosystems. 2007. V. 10. P. 171–184.
- Dean W.E., Gorham E.* Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands // Geology. 1998. V. 26(6). P. 535–538.
- Deemer B.R., Holgerson M.A.* Drivers of methane flux differ between lakes and reservoirs, complicating global upscaling efforts // J. of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. V. 126. Issue 4.
- Deemer B., Harrison A., Li S., Beaulieu J., Delsontro T.* Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis // Springer. BioScience, 2016. V. 66. № 11. P. 949–964.
- Demarty M., Bastien J., Tremblay A., Hesslein R.H., and Gill R.* Greenhouse gas emissions from boreal reservoirs in Manitoba and Quebec, Canada, measured with automated systems // Environmental Science & Technology. 2009. V. 43. P. 8908–8915.
- Diem T.* Methane dynamics in oxic and anoxic aquatic systems. Dissertation submitted to ETH Zurich for the degree of Doctor of Sciences. Zurich, 2008. 99 p. Available at: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:41846/eth-41846-02.pdf> (accessed May 10, 2016)
- Fearnside P.* Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Controversies Provide a Springboard for Rethinking a Supposedly ‘Clean’ Energy Source. An Editorial Comment // Clim. Change. 2006. V. 75. P. 103–109.
- Fedorov M. P., Elistratov V. V., Maslikov V. I., Sidorenko G. I., Chusov A. N., Atrashenok V. P., Molodsov D. V., Savvichev A. S., Zinchenko A. V.* Reservoir Greenhouse Gas Emissions at Russian HPP // Power Technology and Engineering. 2015. V. 49. No. 1. P. 33–39.
- Gash J., Goldenfum J. et al.* Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs // The World Bank Contract 7150219. 2010. 166 p.
- Gruca-Rokosz R., Tomaszek J.* Methane and Carbon Dioxide in the Sediment of a Eutrophic Reservoir: Production Pathways and Diffusion Fluxes at the Sediment–Water Interface // Water, Air and Soil Pollution. 2015. V. 226. P. 16–32.
- Guerin F., Abril G.* Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir // J. of Geophysical Research. 2007. V. 112. P. 3006–3020.
- Harby A., Overjordet I.B.* CEDREN –Funnel traps for GHG bubbling in reservoirs. Procedures of operation. SINTEF, 2014. 7 p.
- Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O'Malley M.* Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission // Washington: Environmental Science and Technology. 2016. V. 1. P. 1–11.
- Kemenes A., Melack J., Forsberg B.* Downstream emissions of CH₄ and CO₂ from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin // Columbia: Inland Waters. 2016. V. 6. P. 295–302.
- Li S., Zhang Q.* Carbon emission from global hydroelectric reservoirs revisited // Environmental science and pollution research international. 2014. V. 21. Pp. 131–137.
- Liikanen A., Murtoniemi T., Tanskanen H., Väisänen T., Martikainen P.* Effects of temperature and oxygen availability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of a eutrophic mid-boreal lake // Biogeochemistry. 2002. V. 59. № 3. P. 269–286.
- Lomov V., Grechushnikova M., Kazantsev V., Repina I.* Reasons and patterns of spatio-temporal variability of methane emission from the Mozhaysk reservoir in summer period // E3S Web of Conferences IV Vinogradov Conference. 2020. V. 163. P. 03010.
- Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)* IPCC: Climate Change

- 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. 2391 P.
- McCully P. Loosening the hydroindustry's grip on reservoir greenhouse gas emissions research 2006. Available at: <https://www.internationalrivers.org/files/attached-files/fizzyscience2006.pdf> (accessed May 10, 2016).
- Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M. Methane Ebullition in Temperate Hydropower Reservoirs and Implications for US Policy on Greenhouse Gas Emissions // USA: Environmental Management. 2017. V. 60. P. 1–15.
- Ostrovsky I., McGinnis D., Lapidus L., Eckert W. Quantifying gas ebullition with echosounder: the role of methane transport by bubbles in a medium-sized lake // USA: Limnology and Oceanography: Methods. 2008. V. 6. P. 105–118.
- Rosa L. P., Schaeffer R. Greenhouse gas emissions from powerdams // *Ambio*. 1994. V. 23(2). P. 164–165.
- Rosentreter J. A., Borges, A. V., Deemer, B. R., Holgersson, M. A., Liu, S., Song, C., Eyre, B. D. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources // *Nature Geoscience*. 2021. V. 14. № 4. P. 225–230.
- Rudd J. W. M., Harris R., Kelly C. A., Hecky R. E. Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases? // *Ambio*. 1993. V. 22. P. 246–248.
- Soumis N., Duchemin E., Canuel R., Lucotte M. Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States // *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. V. 18, GB3022.
- Striegl Robert G., Michmerhuizen Catherine M., Survey U. S. Geological. Hydrologic influence on methane and carbon dioxide dynamics at two northcentral Minnesota lakes // *Limnol. Oceanogr.* 1998. V. 43. № 7. P. 1519–1529.
- Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. Impact of large dams: A Global Assessment. Berlin: Water Recourses Development and Management. 2012. 410 p.
- Tranvik L. J. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // *Limnol. Oceanogr.* 2009. V. 54. P. 2298–2314.
- Tremblay A., Roehm C., Varfalvy L., Garneau M. Greenhouse Gas Emissions – Fluxes and Processes. Berlin: Springer, 2005. 732 p.
- Tremblay A., Varfalvy L., Roehm C. and Garneau M. (eds.) Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments. Environmental Science Series, Springer, New York, 2005. 732 p.

VARIABILITY OF METHANE CONTENT AND FLUXES IN THE RYBINSK RESERVOIR BASED ON FIELD OBSERVATIONS IN DIFFERENT SEASONS OF THE YEAR

V. A. Lomov^{1,2,3,*}, N. L. Frolova^{1,2}, V. A. Efimov^{1,2}, I. A. Repina^{1,3}, Li Zhe⁴, Yang Liu⁴

¹Obukhov Institute of Atmosphere Physics RAS, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, d. 1, Moscow, 119991 Russia

³RCC MSU, Laboratory of Supercomputer Modelling of Natural and Climatic Processes, d. 1, str. 4, Moscow, 119234 Russia

⁴Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, 266 Fangzheng Avenue, Chongqing, 400714 China

*e-mail: lomson620@mail.ru

The formation of methane fluxes in the Rybinsk reservoir and the variability of its content in water were investigated during several field campaigns on the reservoir in different seasons. The Rybinsk reservoir is a very large, relatively shallow, low-flow, mesotrophic-eutrophic, morphologically complex basin-valley type reservoir with perennial flow regulation, created on the Upper Volga in 1941. In total, water and air sampling was carried out at 71 stations to determine methane concentration, which was combined with measurements of water column characteristics. As a result, a network of reference stations was established, where regular measurements are made, as well as additional stations in the water area and river estuaries. For control purposes, water samples were taken at the hydroelectric power plant units and downstream of the Sheksninskaya HPP dam, placed within the Rybinsk city. In general, the Rybinsk reservoir is characterised by relatively low methane concentrations - at most stations the average content of dissolved CH₄ in water does not exceed 20 µl/l. The lowest concentrations were observed during the winter period. Methane fluxes from the surface of the Rybinsk reservoir vary from 4 to 718 mgC-CH₄ m⁻² day⁻¹. Specific fluxes in summer period are larger than those measured in autumn, also in summer the spatial variability of the measured fluxes is more significant. Flux values depend on reservoir stratification, oxygen content in water, organic matter in bottom sediments and other factors. Methane degassing through the dam is significantly less than the fluxes from the surface.

Keywords: methane, specific methane fluxes, water methane content, reservoir