

СОДЕРЖАНИЕ И ПОТОКИ МЕТАНА В ВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ

© 2023 г. М. Г. Гречушникова^{a, b}, И. А. Репина^{a, c, *}, Н. Л. Фролова^{a, b}, С. А. Агафонова^{a, b},
В. А. Ломов^{a, b, c}, Д. И. Соколов^{a, b}, В. М. Степаненко^{a, b, c}, В. А. Ефимов^{a, b},
А. А. Мольков^d, И. А. Капустин^d

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

^bМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

^cМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

^dИнститут прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

*e-mail: repina@ifaran.ru

Поступила в редакцию 05.05.2023 г.

После доработки 24.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

В статье приведены результаты измерений удельного потока метана и его содержания в воде некоторых водохранилищ Волжского каскада: Ивановском, Рыбинском, Горьковском, Куйбышевском, Волгоградском за 2017–2023 гг. Измерения удельного потока проводились методом плавучих камер, определение содержания метана в пробах — методом headspace. Выявлена пространственная и сезонная изменчивость как содержания метана, так и его эмиссии в зависимости от коэффициента водообмена, погодных условий, характера донных отложений, глубины. Большие концентрации и значения удельного потока метана наблюдаются в период стратификации; при вертикальном перемешивании значения потоков существенно уменьшаются. Максимальные значения удельного потока характерны для сильно зарастающего мелководного Шошинского плеса Ивановского водохранилища (до 334 мгС-СН₄/(м² сут)), затопленной левобережной поймы Горьковского водохранилища (до 548 мгС-СН₄/(м² сут)), где они связаны со слабой проточностью и внутриводоемными циркуляциями, а также для залива р. Чеснавы на Рыбинском водохранилище (до 1086 мгС-СН₄/(м² сут)), что связано с антропогенным загрязнением. В заливах Куйбышевского и Волгоградского водохранилищ, принимающих притоки с повышенной минерализацией, возможно усиление стратификации из-за плотностного расслоения, формирование зон с дефицитом кислорода и увеличение удельного потока метана, несмотря на небольшое количество органического вещества в грунтах. На примере Горьковского водохранилища показано влияние плотины на пространственную структуру потока и содержания метана. Сравнение с обобщенными данными по удельным потокам метана с водохранилищ умеренной зоны показало, что в Волжском каскаде эти величины ниже во все месяцы периода открытой воды, кроме августа.

Ключевые слова: метан, удельный поток, водохранилище, деструкция, водообмен, цветение

DOI: 10.31857/S2587556623060080, **EDN:** FNQMWD

ВВЕДЕНИЕ

Волжский каскад водохранилищ начали возводить одним из первых в России с целью энергоснабжения Москвы и центрального округа страны. Выработка электроэнергии на ГЭС до недавнего времени считалась экологически чистым производством: посчитано, что каскад в волжском бассейне экономит 12–13 млн т. у. т. ежегодно и около 30 млн т атмосферного кислорода (РусГидро ..., 2008). Но при этом вопрос об экологической и углеродной нейтральности искусственных водоемов остается открытым. Кроме проблем загрязнения воды и донных отложений, влияния на климат окружающих территорий водохрани-

лища могут быть знаковым источником эмиссии парниковых газов, и прежде всего метана, в атмосферу (Deemer et al., 2016; Giles, 2006; Greenhouse ..., 2005; Li and Zhang, 2014; Lima et al., 2006; Louis et al., 2000, Rosentreter et al., 2021). Основными факторами, определяющими содержание метана в водоемах и его эмиссию в атмосферу, являются их термический и кислородный режим, глубина, трофический статус, особенности донных отложений (Гарькуша, Фёдоров, 2021; Deemer et al., 2016; Johnson et al., 2021; Lima et al., 2006; Louis et al., 2000).

До недавнего времени эмиссия метана из водохранилищ России изучалась фрагментарно. Российский опыт оценки выбросов парниковых

газов обобщен в (Елистратов и др., 2014). В Волжском бассейне основные работы были посвящены определению содержания метана в воде и донных отложениях. В результате изучения этапов деструкции органического вещества (ОВ) в донных отложениях (ДО), в том числе метаногенеза, были выявлены следующие зональные особенности ее распределения (Дзюбан, 1999, 2010): в грунтах северных водохранилищ Верхней Волги и Камы доминируют процессы анаэробного распада, на Нижней Волге преобладает аэробная деструкция ОВ, а на Средней Волге процессы аэробного и анаэробного распада сбалансированы. Для водохранилищ Волжского каскада характерно снижение концентрации метана в близких по физико-химическим свойствам отложениях с севера на юг (Дзюбан, 1999). Наибольшая скорость метанобразования отмечается на ряде станций Рыбинского, Горьковского и Чебоксарского водохранилищ, где в восстановленных (слой 2–5 см), богатых органическим углеродом (C_{org}) илах она достигает уровня высокотрофных озер (Dzyuban, 2004). По данным многолетних исследований газохроматографическим методом было выявлено, что в период без ледостава содержание метана в воде варьируется от 1–5 мкл/л в открытых плесах вне городов до 20–60 мкл/л в зоне влияния промышленных центров. В бытовых и хозяйственных сточных водах и в портовых акваториях содержание метана достигает 100–200 мкл/л.

Российскими учеными выполнен большой цикл исследований по образованию растворенных парниковых газов в водных объектах, результаты которых были обобщены в работах (Гарькуша, Федоров, 2021; Мартынова, 2010; Федоров и др., 2005). Из водохранилищ Волжского каскада наиболее подробно в отношении режима метана изучено Рыбинское водохранилище и его притоки. В первую очередь отметим работы А.Н. Дзюбана (2011, 2016 и др.). Им изучены процессы цикла метана и деструкции органического вещества в донных отложениях на отдельных участках Рыбинского водохранилища, а также в его притоках. Показано, что наибольшая концентрация характерна для р. Шексны в районе Череповца — 66 мкл/л, такие значения связаны скорее всего с антропогенным загрязнением р. Шексны. Здесь источник поступления метана в водную массу не только иловой метаногенез (автохтонный метан), но также хозяйственные, особенно нефтяные отходы (аллохтонный источник) (Дзюбан, 2011). В притоках Рыбинского водохранилища, испытывающих слабое или умеренное загрязнение (например, рр. Согожа, Ухра), содержание метана невелико — 13–16 мкл/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. Это

подтверждено данными (Аверина и др., 2022) о концентрациях метана в воде, полученными в ходе зимней студенческой экспедиции кафедры гидрологии суши МГУ, посвященной оценке общего содержания метана в Рыбинском водохранилище в зимний период и расчету отдельных составляющих баланса метана.

Несмотря на достаточно большой объем проведенных исследований (см. выше), прямые измерения удельного потока метана от поверхности водохранилища в атмосферу редки и для водохранилищ вне Европейской территории РФ практически отсутствуют. В (Репина и др., 2022) приведены предварительные результаты измерений эмиссии метана из водохранилищ различных регионов России и показан значительный региональный разброс значений. Для некоторых водохранилищ Волжского каскада (Волгоградское, Куйбышевское), данные измерений удельного потока метана единичны, по Ивановскому водохранилищу опубликованы данные о межгодовой изменчивости в летний период, поскольку с 2020 г. на нем проводятся регулярные съемки сотрудниками ИВНИС ИВП РАН. На данном водохранилище сезонного регулирования стока выявлена значительная пространственно-временная неоднородность потоков метана, связанная как с синоптическими условиями и кислородным режимом, так и с особенностями осадконакопления и развития фитопланктона (Гречушникова и др., 2023).

Наиболее изученным объектом в отношении содержания и эмиссии метана является слабопроточное Можайское водохранилище: многолетние измерения показали существенную внутрисезонную и межгодовую изменчивость удельного потока метана с его поверхности (Гречушникова и др., 2017, 2019; Lomov et al., 2020): от 0.2 мгC-CH₄/(м² сут) в начале летнего сезона до 400 мгC-CH₄/(м² сут) к моменту окончания периода летней стратификации. Причем межгодовые различия потоков, полученных в один и тот же сезон в разные годы, могут достигать более 100 мгC-CH₄/(м² сут), что связано с гидрологическими и синоптическими условиями конкретного года.

Сравнение измерений, проведенных в один период года на находящихся в одной климатической зоне Можайском и Горьковском водохранилищах (Гречушникова и др., 2018), показало, что проточность водохранилища в значительной степени оказывает влияние на потоки метана и его содержание в водной толще. В высокопроточном Горьковском водохранилище, в котором практически не образуется бескислородных зон, содержание метана в воде не превышает 100 мкл/л за весь летний период 2017 г. Поток метана в атмосферу над русловыми станциями также был очень незначителен, менее 5.0 мгC-CH₄/(м² сут) при лучшей, чем в малопроточных водоемах, аэрации

Таблица 1. Морфометрические и воднобалансовые характеристики водохранилищ

Водохранилище (год/период создания)	Коэффициент водообмена, K_v , год ⁻¹	Характеристика при нормальном подпорном уровне			Приток (сток), км ³ /год
		площадь зеркала, км ²	объем, км ³	глубина средняя/ максимальная, м	
Иваньковское (1937 г.)	9.0–13.6	327	1.12	4.0/19.0	9.95
Рыбинское (1941–1947 гг.)	1.2–2.6	4580	25.4	5.6/30.0	31.4
Горьковское (1955–1957 гг.)	5.4–6.1	1591	8.82	3.7/22.0	52.6
Куйбышевское (1955–1957 гг.)	2.7–5.7	6150	58.0	8.9/40.0	241
Волгоградское (1958–1960 гг.)	7.5–8.3	3117	31.5	10.0/41.0	260

Составлено по: Вода России. Научно-популярная энциклопедия, 2021 (<http://water-ru.ru>, дата обращения 20.03.2022); (Иваньковское ..., 2000; Чистая ..., 2020).

придонных горизонтов, в то время как на Можайском водохранилище потоки могут составлять более 300 мгС-СН₄/(м² сут). Детальные исследования в приплотинном районе показали, что работа ГЭС оказывает влияние на содержание и эмиссию метана из-за разрушения стратификации и смыва вторичных отложений. Дальность распространения влияния Нижегородской ГЭС на содержание и эмиссию метана оценивается в 7 км (Гречушников и др., 2022).

Цель настоящей работы – обобщить материалы измерений сезонной и годовой изменчивости содержания и удельного потока метана из разнотипных водохранилищ Волжского каскада.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

Иваньковское водохранилище – первая ступень Волжско-Камского каскада водохранилищ, водоем сезонного регулирования, созданный одним из первых (1937 г.). Это самое мелководное из крупных водохранилищ России (табл. 1). Из-за обширного мелководного Шошинского плеса около половины всей площади данного водохранилища занимает акватория глубиной менее 2 м при нормальном подпорном уровне (НПУ). Колебания уровня воды в нем в течение года достигают 4 м (Иваньковское ..., 2000). Водные массы водохранилища кроме водоснабжения столицы также используются для охлаждения систем Коньковской ГРЭС, что сказывается на тепловом режиме водоема ниже по течению от Мошковского залива. Водохранилище относится к доливному типу и имеет довольно сложную конфигурацию (рис. 1). В водохранилище выделяются четыре плеса, морфологические особенности которых обуславливают их эколого-биологические различия (Никаноров, 1975).

Рыбинское водохранилище создано на территории бассейнов трех крупных рек – Волги, Мологи и Шексны, что предопределило его сложную морфологию. Это крупное котловинно-долинное водохранилище, являющееся основным регулятором стока Верхней Волги (осуществляет непол-

ное многолетнее регулирование, см. табл. 1). Коэффициент водообмена в разные по водности годы изменяется от 1.2 до 2.6 раз в год. Колебания уровня воды в течение года достигают 4.9 м (Литвинов, Рошупко, 2007). За счет своей формы и размеров отличается от остальных объектов исследования возможностью формирования термического бара – разделения водоема по условиям стратификации на теплоактивную и теплоинерционную области.

Горьковское водохранилище – крупное и относительно мелководное. От Рыбинска до устья р. Елнати выделяют русловую часть, где сохраняется зона выклинивания подпора, ниже до плотины Нижегородской ГЭС (120 км) расположено озеровидное расширение. Это морфологически сложное пойменно-долинное водохранилище. Регулирование стока осуществляется в недельном и сезонном масштабе с внутригодовой амплитудой уровня воды 3 м (см. табл. 1).

Куйбышевское – крупнейшее в Евразии морфологически сложное пойменно-долинное водохранилище. Осуществляет глубокое сезонное регулирование стока. В период осенне-зимней сработки уровень воды снижается на 5.0–7.8 м. В весенний период водные ресурсы Куйбышевского водохранилища используются для обеспечения специального сельскохоззяйственного и рыбобохозяйственного плпуска через Волгоградский гидроузел. Средняя глубина водохранилища 8.9 м, максимальная – 40 м (см. табл. 1). Наибольшей ширины оно достигает на участке пгт Лаишево–р.п. Камское устье (до 40 км) и в Верхне-Ульяновском плесе (до 27 км). Наибольшее загрязнение поступает в водоем с территории Татарстана. К плотине Жигулевской ГЭС показатели качества воды водохранилища приходят в норму (Куйбышевское ..., 2008).

Волгоградское – морфологически простое пойменно-долинное водохранилище средней глубины, сезонного регулирования стока. Замыкает Волжско-Камский каскад водохранилищ. Волгоградское водохранилище имеет относительно постоянный уровенный режим, многолет-

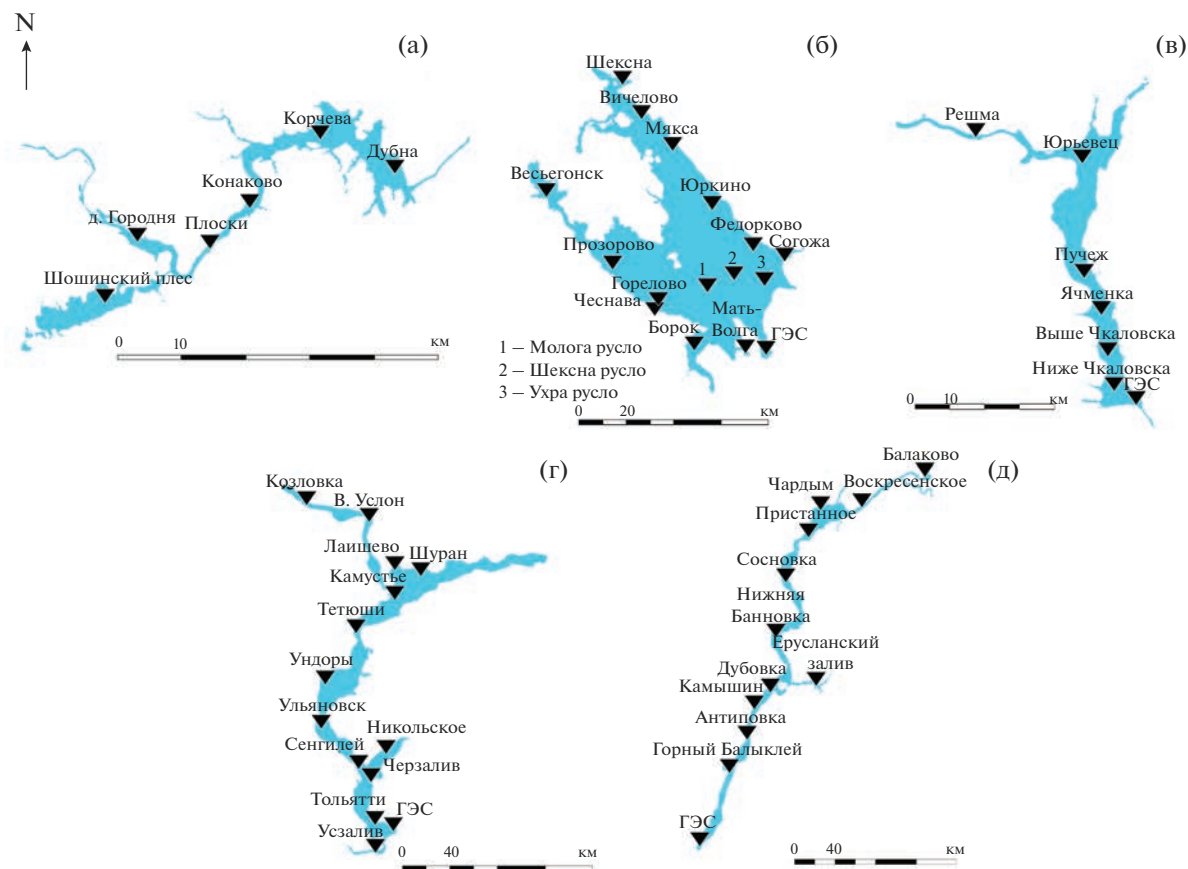


Рис. 1. Схемы положения станций отбора проб на изучаемых водохранилищах: (а) Ивановское, (б) Рыбинское, (в) Горьковское, (г) Куйбышевское, (д) Волгоградское.

ная величина колебаний уровня достигает 3.6 м^1 . Водохранилище осуществляет сезонное, недельное и суточное регулирование стока. Гидрографическая сеть в бассейне водохранилища развита слабо, суммарный расход боковых притоков составляет менее 1% от общего поверхностного притока. На участке Камышин–Волжская ГЭС постоянно отмечается повышенное содержание органических веществ, нефтепродуктов.

В годовом термическом цикле исследуемых водохранилищ выделяется зимний период с наличием ледостава, периоды весенней и осенней конвекции, период летнего нагревания и летне-осеннего охлаждения. Наибольшая продолжительность ледостава существует на Рыбинском водохранилище (158 сут) (Гидрометеорологический ..., 1975). На проточных и мелководных участках температура воды и другие характеристики распределены более однородно. Весенний период нагревания приходится на период наполнения водохранилищ. В Ивановском водохранилище при значительном транзите во вторую

фазу половодья может сформироваться горизонтальная неоднородность при равномерном распределении характеристик на вертикали. В Горьковском водохранилище в мае более теплые воды Немды и Унжи вытесняют холодную водную массу. Объем Рыбинского водохранилища превышает объем притока, поэтому в нем возникает неоднородное распределение характеристик. На спаде половодья здесь начинается термическое расслоение. В наибольшей степени оно выражено в озеровидных участках. Ветровое перемешивание способствует поступлению тепла в придонные слои. Понижение температуры начинается в августе, роль конвективных процессов усиливается в сентябре.

Для водохранилищ Верхней Волги сезонного регулирования стока наличие стратификации характерно преимущественно в первую половину лета, к августу температура по вертикали выравнивается. Но особенности синоптических условий каждого конкретного года в значительной степени обуславливают различия гидрологического режима водохранилищ. Так, например, в июле 2020 г. при дождливой и прохладной погоде наблюдалась слабая стратификация, малая мине-

¹ Вода России. Научно-популярная энциклопедия. 2021. <http://water-rf.ru> (дата обращения 20.03.2022).

рализация и благоприятный кислородный режим в Иваньковском водохранилище, а продолжительная жаркая погода летом 2022 г. привела к образованию в нем бескислородной зоны до горизонтов 9–10 м (Гречушникова и др., 2023).

На Куйбышевском водохранилище максимальная среднемесячная температура воды в поверхностном слое наблюдается в июле (до 21.8°C в Приплотинном плесе). Период ледостава составляет в среднем 145 дней. Наиболее интенсивные термические процессы протекают в верхней части водохранилища. Ветровое волнение способно вызвать полное перемешивание водных масс и выравнивание температуры по глубине, кроме наиболее глубокой приплотинной части водохранилища. На приплотинном участке в его глубоководной зоне образуется слой температурного скачка с градиентом до 8.0°–11.0°C при температуре воды на поверхности 24.0°–31.0°C (Куйбышевское ..., 2008).

Газовый режим Волгоградского водохранилища благоприятен для гидробионтов, концентрация растворенного кислорода составляет 5.5–17.4 мг/л (58–123% насыщения) (Лазарева и др., 2018; Шашуловский, Мосияш, 2010), несмотря на снижение скорости стокового течения от верховьев к плотине.

При выраженных межгодовых флуктуациях, которые зависят от синоптических условий, средние значения концентрации хлорофилла *a* характеризуют Иваньковское водохранилище как эвтрофное, Волгоградское – как мезотрофное. Трофический статус Рыбинского, Горьковского и Куйбышевского водохранилищ меняется от мезотрофного до умеренно эвтрофного и эвтрофного. Изолированные от проточного русла участки акватории во всех водохранилищах характеризуются как эвтрофные (например, Шошинский, Черемшанский заливы) (Минеева и др., 2020).

Следует отметить, что для Горьковского, Куйбышевского и Волгоградского водохранилищ большое распространение получили обвальнопользовательские процессы, что, несомненно, повлияло на состав и формирование донного комплекса. По данным исследований ИБВВ РАН (Законнов, 2016), основным источником поступления наносов в волжские водохранилища является береговая абразия и эрозия ложа: до 87% в Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах. Толщина слоя илов постепенно увеличивается от водохранилищ Верхней Волги к Средней и Нижней, что связано с составом пород и ландшафтами водосборов. Волгоградское водохранилище является классическим примером в системе крупных равнинных водохранилищ, когда в речном верхнем участке наблюдается уменьшение толщины и объема илов, затем повышение в среднем районе, и понижение в приплотинном районе. Открытые глубоководные заливы на Горьковском (Унжи и Немды), Куйбышевском (Черемшанский) и Вол-

гоградском (Ерусланский) водохранилищах перехватывают часть твердого стока притоков и уменьшают толщину слоя илов по затопленному руслу Волги. Среднегодовое илонакопление уменьшается от северных водохранилищ бассейна Волги к южным.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения пространственно-временной изменчивости содержания и удельных потоков метана на водоемах в различные сезоны (в том числе во время ледостава) выполнялись съемки на опорных станциях (см. рис. 1). Станции назначались таким образом, чтобы наиболее полно охватить различные морфологические участки (районы) водохранилищ, а также мелководья и крупные заливы. Производились измерения вертикального распределения температуры воды, растворенного кислорода, электропроводности (зонды YSI ProOdo и Pro30 с точностью 0.2°C, 0.1 мг/л, 1 мкСм/см соответственно, зонд YSI Echo 2.0 с точностью 0.01°C, 0.1 мг/л, 1 мкСм/см соответственно).

Удельный поток метана в атмосферу определялся с лодки методом плавучих камер (Bastviken et al., 2011). Суть метода заключается в постановке на поверхность воды герметичных пластиковых камер с поплавками (время экспозиции, как правило, не более 1 часа, площадь основания камер 0.065–0.083 м², объем – 0.006–0.009 м³). В склянки, заполненные насыщенным раствором NaCl, шприцом отбирается воздух из камеры в начале и в конце времени экспозиции. Раствор поваренной соли необходим, чтобы исключить возможность растворения метана в воде, а также для ингибирования микробиологической деятельности. Значения удельного потока метана определялось по разности концентрации метана в камере в начале и в конце эксперимента. Определение концентрации метана в пробах воды производилось методом headspace (Bastviken et al., 2010). Пробы воды отбирались с поверхности, у дна, выше и ниже слоя температурного скачка при его наличии. Содержание метана в отобранных пробах определялось на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором Хроматэк-Кристалл 5000.2.

Отбор проб донных отложений производили дночерпателем Экмана–Бэрда, анализ производился для верхнего слоя грунта толщиной не более 10 см. Определение содержания органического вещества в донных отложениях водохранилищ производили методом потерь веса при прокаливании (ГОСТ 23740–2016).

На каждой станции производились измерения метеопараметров (скорости ветра, температуры воздуха, атмосферного давления) с использованием портативной метеостанции Kestrel. Сроки

экспедиций, проведенных авторами, приведены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В Ивановском водохранилище в периоды проведения съемок в августе 2020 и 2021 гг. содержание растворенного кислорода снижалось до величин менее 2 мг/л только в придонных горизонтах наиболее глубоководных станций, а в жарком 2022 г. зона с дефицитом кислорода достигала горизонтов 9–10 м от поверхности воды при глубинах на станциях измерений 14.0–15.5 и 7.0–8.0 м от поверхности при глубинах на станциях 9.0–11.0 м. Устойчивый антициклон в июле 2022 г. привел к значительному прогреву водной массы водохранилища (температура придонного слоя воды у плотины достигала 21.2°C) и формирования устойчивого слоя температурного скачка по всему водоему с максимальными градиентами температуры воды на станциях 1.0–3.7°C/м. В зимние периоды измерения отсутствовали. Весной в мае 2022 г. наблюдалось равномерное распределение температуры и растворенного кислорода по вертикали на всем протяжении водоема.

На Рыбинском водохранилище первая съемка с измерениями содержания и удельных потоков метана была проведена осенью 2021 г. В это время было зафиксировано охлаждение водоема при полной гомотермии (средняя температура около 13.5°C). Для зимнего и весеннего периодов 2022 г. во время ледостава на Рыбинском водохранилище наблюдается выраженная обратная температурная стратификация (около 0°C в подледном горизонте, 2.0°–3.0°C у дна). Лето характеризуется либо слабой прямой стратификацией, либо перемешанной однородной водной толщей. Высоких температурных градиентов в водоеме не наблюдается из-за активного ветроволнового перемешивания, связанного с котловинной формой чаши водохранилища и большой длиной разгона ветра. На большей части акватории вода Рыбинского водохранилища хорошо аэрирована (более 90% насыщения). Пониженное содержание кислорода в воде может наблюдаться при ледоставе в районе затопленных русел Мологи и Шексны. Аноксия (менее 1.0 мг/л) была зафиксирована в летний период в придонных горизонтах наиболее глубоких участков приплотинных плесов Волги и Шексны, а также в районе Восьегона над затопленным руслом Мологи.

В Горьковском водохранилище в периоды проведения исследований выраженная стратификация отсутствовала: в период открытой воды температура воды убывала ко дну без значительных скачков, наибольшая разность в поверхностном и придонном горизонте достигала нескольких градусов на самых глубоких вертикалях. В жаркую погоду формировался синоптический слой скачка со вспышками цветения и увеличе-

ния содержания кислорода в верхнем приповерхностном слое до 13.0 и более мг/л. Абсолютные значения температуры воды зависели от погодных условий. Распределение растворенного кислорода имело схожие особенности, понижение его содержания до 2.0 мг/л и менее наблюдалось только в метровом придонном слое. Над затопленным руслом убывание его содержания было выражено менее, чем над затопленной поймой.

На Куйбышевском водохранилище в период проведения зимних съемок температура воды составляла 0.1°C и практически не менялась с глубиной. На станции Черзалив (в Черемшанском заливе) отмечено повышение температуры воды в придонном горизонте до 1.2°–1.9°C. Насыщение кислородом в поверхностном слое составляло преимущественно более 90%, в придонных горизонтах – снижалось до 56% в феврале 2022 г. и до 33% в феврале 2023 г. По данным съемок в период открытой воды стратификация отсутствовала, слой температурного скачка зафиксирован в августе 2021 и 2022 гг. только на станции в Черемшанском заливе. В мае 2022 г. концентрации растворенного кислорода в воде составляли 8.0–9.6 мг/л на участке от Козловки до Сенгилея и 9.0–11.4 мг/л в нижней части водохранилища. В августе 2022 г. содержание растворенного кислорода менялось и по акватории водохранилища, и по глубине (от 0.3 до 17.1 мг/л). В Усинском и Черемшанском заливах концентрации в придонном слое составили 0.9 и 0.3 мг/л соответственно.

Волгоградское водохранилище преимущественно заполнено однородной по составу основной водной массой, часто полностью перемешанной по вертикали в условиях транзитного течения, ветрового перемешивания или осенней конвективно-динамической циркуляции. Водная толща преимущественно близка к 100% насыщению кислородом, при незначительном снижении от 94–99% у поверхности до 93–97% у дна. В зимний период температура воды основной водной массы составляла 0.0°–0.3°C, в заливах наблюдалась обратная стратификация с температурой у дна 0.6°–3.2°C. Содержание кислорода в основной водной массе водохранилища составляло 90–102% насыщения, в придонных горизонтах заливов снижалось до 27–50%.

В ходе проведенных съемок получены данные о распределении органического вещества в составе донных отложений русловой ложбины и некоторых пойменных участков исследуемых водохранилищ (табл. 3), которые согласуются с данными предшествующих измерений, выполненных ИБВВ РАН (Законнов, 2016).

В Ивановском водохранилище в верховьях преобладает песчаный грунт или заиленный песок с минимальным содержанием ОВ, в средней части содержание ОВ составляет 14–16%; в приплотинном районе и Шошинском плесе 10–17 и 11–18% соответственно.

Таблица 2. Результаты натурных измерений удельного потока и содержания метана в водохранилищах

Водохранилище	Дата съемки (количество станций)	Содержание метана в воде (поверхность/дно), мкл/л		Удельный поток метана, мгС-СН ₄ /(м ² сут)	
		основная акватория	отдельные участки	интервал величин с основной акватории	наибольшее значение с отдельных участков
Иваньковское	5–6.08.2020 (5)	$\frac{1.9-17}{8-17}$		2.9–63.4	—
	4–5.08.2021 (5)	$\frac{5.0-14}{4.6-132}$		10.5–224	334 (ст. Шошинский плес)
	21–22.05.2022 (6)	$\frac{2.3-10}{3.4-14}$		3.5–11.2	—
	4–5.08.2022 (6)	$\frac{2.3-14}{73-89}$	$\frac{9.2-11}{435-1000}$ (участок Плоски–Корчева)	2.1–23.4	182 (ст. Шошинский плес)
Рыбинское	12–16.09.2021 (14)	$\frac{1.7-17}{1.2-11}$	67/— (ст. Шексна)	2.4–13.4	30.8–36.2 (верхний бьеф)
	27.01–5.02.2022 (26)	$\frac{0.2-11}{0.3-10}$		—	—
	31.03–3.04.2022 (11)	$\frac{3.4-82}{1.3-28}$		—	—
	7–12.08.2022 (20)	$\frac{1.4-9.9}{1.3-60}$	21/22 (ст. Чеснава) 2.7/404 (ст. Мать-Волга)	5.7–315	1013–1086 (ст. Чеснава)
	27.01–1.02.2023 (17)	$\frac{0.3-49}{0.3-286}$		—	—
Горьковское	27.04.2017 (5)	$\frac{1.6-2.7}{1.6-2.7}$		—	—
	13–15.08.2017 (7)	$\frac{3.5-6.9}{3.6-13}$		5.1–38.6	
	20.01.2018 (5)	1.0–4.3		—	—
	31.03.2018 (5)	0.1–1.5		—	—
	08.06.2018 (3)	$\frac{2.4-3.0}{2.9-5.0}$		2.5	
	9–10.08.2018 (8)	$\frac{2.3-6.0}{1.8-18}$		0.1–5.8	
	08.08.2019 (5)	$\frac{3.0-7.1}{1.9-14}$		0.9–9.4	6.8–16.6 (левобережная пойма в 5 км выше ГЭС)
	26–27.05.2022 (3)	$\frac{1.5-3.7}{1.3-3.7}$		0.1–4.5	
	24–25.08.2022 (8)	$\frac{0.2-0.9}{0.2-18}$	0.4/62 (левобережная пойма в 5 км выше ГЭС)	0.1–25.0	263–548 (левобережная пойма в 5 км выше ГЭС)

Таблица 2. Окончание

Водохранилище	Дата съемки (количество станций)	Содержание метана в воде (поверхность/дно), мкл/л		Удельный поток метана, мгС-СН ₄ /(м ² сут)	
		основная акватория	отдельные участки	интервал величин с основной акватории	наибольшее значение с отдельных участков
Куйбышевское	16–19.08.2021 (10)	$\frac{0.6-16}{1.6-18}$	16/5090 (ст. Черзалив)	1.1–53.5	87.3–236 (ст. Черзалив)
	15–18.02.2022 (12)	$\frac{0.6-4.8}{0.7-4.6}$	67/83 (ст. Черзалив)	—	—
	17–20.05.2022 (13)	$\frac{1.0-3.9}{1.3-3.3}$	$\frac{6.1-11}{4.9-28}$ (ст. Ульяновск, Черзалив)	1.2–11.2	30.6–49.4 (ст. Уззалив, Черзалив)
	16–19.08.2022 (14)	$\frac{2.3-9.9}{3.1-13}$	$\frac{13-44}{110-3060}$ (ст. Ульяновск, Черзалив)	2.5–42.3	228–488 (ст. Ульяновск, Черзалив)
	14–17.02.2023 (13)	$\frac{0.5-8.3}{0.5-5.2}$	133/1.1 (ст. Черзалив)	—	—
Волгоградское	09–20.09.2021 (17)	$\frac{2.0-7.7}{2.5-6.8}$	$\frac{17-42}{3.8-33}$ (заливы Камышинский и Горный Балыклей)	0.5–29.2	40.3–58.2 (Камышинский залив)
	24.02–4.03.2022 (11)	$\frac{1.5-3.6}{1.5-4.4}$	$\frac{4.9-6.4}{3.6-8.3}$ (заливы Камышинский и Ерусланский)	—	—
	13–3.11.2022 (13)	$\frac{0.6-2.1}{0.6-2.1}$	3.8/3.9 (залив Горный Балыклей)	0.6–9.7	—

Из обследованных авторами станций на Рыбинском водохранилище наибольшее содержание ОВ отмечается в районе монумента “Мать-Волга” и в устье р. Согожа (возможные причины: наличие рыбоконсервного завода и птицефабрики, слабое перемешивание вод в устье за автомобильным мостом). Из-за загрязнения при наличии подпора в устье реки создаются предпосылки к эвтрофированию и аккумуляции органических илов. Высокое содержание органических веществ отмечается в районе Череповца (станция Шексна, см. рис. 1), в затопленных руслах рек, где нет такого интенсивного перемешивания водной толщи, как на затопленной пойме, что способствует аккумуляции ОВ. Для Рыбинского водохранилища характерны неравномерное распределение типов донных отложений и вариация содержания ОВ в пределах 2–39%.

В Горьковском водохранилище комплекс измерений проводился авторами преимущественно в озерной части, а грунтовая съемка на участке ниже Чкаловска. Выявлена пространственная неоднородность распределения ДО: из-за влияния

ГЭС, выражающегося в трансформации поля течений возле плотины, на расстоянии нескольких километров вторичные отложения не накапливаются из-за взмучивания и смыва течениями (Гречушникова и др., 2022). На удалении от плотины порядка 7 км в русловой ложбине преобладает коричневый или оливковый ил с содержанием ОВ 10–17%, а левобережная пойма (в 5 км выше ГЭС) отличается большим содержанием ОВ (17–23%) и более темным оттенком ила, вплоть до черных включений, свидетельствующих о периодической аноксии.

Содержание ОВ в ДО Куйбышевского водохранилища менее изменчиво, чем в Рыбинском. По данным отбора проб оно максимально на станции Камустье, относительно равномерно по длине (8–10%) и минимально на станции Черзалив (2–7%).

В Волгоградском водохранилище содержание ОВ в илах русловой ложбины снижается от 13 (Чардым) до 7% (Дубовка).

Как будет показано далее, содержание ОВ в грунте оказывает влияние на величину потока ме-

Таблица 3. Массовая доля органического вещества в донных отложениях водохранилищ

Станция пробоотбора	Органическое вещество, %	Описание донных отложений
Иваньковское водохранилище		
Городня	0.3	Песок
Шошинский плес	11–18	Серый, однородный, с черными включениями, тонкодисперсный ил
Плоски	16	Светло-коричневый, рыхлый, тонкодисперсный ил
Конаково	15–16	Светло-коричневый, рыхлый, тонкодисперсный ил
Корчева	14–15	Серый, однородный, рыхлый, тонкодисперсный ил
Дубна	10–17	Светло-коричневый, однородный, плотный, тонкодисперсный ил
Рыбинское водохранилище		
Весьегонск	26	Тонкодисперсный серый ил
р. Шексна	19–28	Коричневый плотный ил с вкраплениями песка
ГЭС	19–21	Тонкодисперсный серый ил
Устье р. Согожа	34	Торфянистый ил
Мать-Волга	7–39	Красновато-коричневый ил с вкраплениями песка
Борок	15	Однородный кофейно-коричневый ил
Горелово	2	Светло-коричневый опесчаненный ил
Чеснава	8	Нет данных
Прозорово	8	Песок
Ухра (русло/пойма)	14–23/0.5	Оливковый комковатый ил, остатки моллюсков
Молога (русло/пойма)	25/5	Светло-коричневый опесчаненный ил/светло-коричневый песок
Федорково	0.5	Желтый песок
Горьковское водохранилище		
Приплотинный район (около 7 км от ГЭС)	2–9	Плотный заиленный песок, с удалением от плотины появляется тонкий светло-коричневый наил
Русло вдоль правого берега (до Чкаловска)	10–17	Светло-коричневый или серый ил, черные включения внизу колонки, сверху наил (1–3 мм)
Левобережная пойма приплотинного района	17–23	Оливковый тонкодисперсный ил с мелкими остатками растительности
Куйбышевское водохранилище		
Камское устье	12–15	Черный ил, с железистым запахом
Лаишево	9	Черный ил
Шуран	9	Коричневый ил с моллюсками
Ундоры	6–14	Черный ил
Ульяновск	8	Оливковый ил
Сенгилей	8	Коричневый ил с моллюсками
Усинский залив	15	Черный ил
Тольятти	8	Черный ил
Черемшанский залив	2–7	Ил с остатками водорослей, в августе 2023 г. коричневая супесь
Волгоградское водохранилище		
Чардым	13	Песчанистый ил с множеством раковин моллюсков и примесью гравия
Сосновка	8	Тонкодисперсный ил, встречаются раковины моллюсков
Нижняя Банновка	11	Тонкодисперсный ил, встречаются раковины моллюсков
Дубовка	7	Темный (местами черный) тонкодисперсный ил, встречаются раковины моллюсков

тана в конкретном районе, но данный фактор является не единственным, его определяющим.

В табл. 2 приведены данные измерений содержания и удельного потока метана, повышенные значения с указанием станций выделены в отдельных столбцах. Наименьшие значения содержания метана и удельного потока выявлены в Волгоградском и Горьковском водохранилищах (до 20 мкл/л в придонном горизонте и до 38.6 мгС-СН₄/(м² сут) в основной части акватории). В последнем повышенные значения удельного потока выявлены локально над левобережной поймой, характеризующейся образованием застойных зон, в то время как вдоль затопленного русла наблюдается стоковое течение, препятствующее формированию стратификации. В Волгоградском водохранилище повышенное содержание метана выявлено в Камышинском заливе. Причиной этого может быть антропогенное загрязнение, связанное с поступлением загрязненных вод г. Камышина в залив.

Наиболее высокие концентрации метана (до 3–5 тыс. мкл/л у дна) определены в Куйбышевском водохранилище в летний период. Они приурочены к пойме Ульяновского плеса (станция Ульяновск) и Черемшанскому заливу (станция Черзалив). В данном водохранилище, также как и на Горьковском водохранилище, в поперечных створах наблюдаются различные условия для эмиссии метана, что связано с особенностями циркуляции, стокового течения и стратификации водной толщи. Наибольший удельный поток метана во все сезоны измерений определен в районе ст. Черзалив. При общей глубине 16 м в августе 2021 и 2022 гг. до горизонта 9–10 м от поверхности на этой станции наблюдалась аноксия. Причина развития аноксии состоит в плотностном расслоении, поскольку р. Большой Черемшан приносит в залив более минерализованные воды (в августе 2022 г. 755 мкСм/см), и в устьевой части залива по вертикали наблюдается неоднородное распределение минерализации воды с увеличением ее к придонным горизонтам на 40–90 мкСм/см летом и на 120–160 мкСм/см зимой. В весенний период после половодья и конвективного перемешивания различия отсутствуют.

Иваньковское водохранилище отличается наибольшей проточностью среди исследуемых водоемов. Водобмен в нем происходит примерно один раз в месяц (см. табл. 1). Однако на формирование его гидрологической структуры и газового режима значительное влияние оказывают синоптические условия и водность сезона. В 2020 г. температура на съемке не превышала 22°C, в 2021 – 26.8°C, в 2022 г. достигала 29.9°C. Приток за предшествующий съемке месяц (июль) составил 1315.8, 242.3 и 291.95 млн м³ соответственно. В жарком 2022 г. при уровне воды на 0.5 м ниже предыдущих двух лет содержание метана в придонных горизонтах было на порядок больше, чем в 2020–2021 гг. Оно

не достигало таких больших значений, как в Куйбышевском водохранилище, наиболее высокое содержание (444–1000 мкл/л) отмечалось на участке Плоски–Корчева. По материалам комплексных съемок НИС Конаково ИВП РАН (Гречушникова и др., 2023), увеличение выхода метана из ДО могло быть связано не только с наибольшим прогревом донных отложений, но и с активизацией биотурбации, вызванной бескислородными условиями, сформировавшимися летом 2022 г. На недостаток растворенного кислорода в воде олигохеты реагируют более активными “дыхательными” движениями и увеличением части тела, участвующей в этих движениях, что способствует биологическому перемешиванию субстрата. Результатом биотурбации является изменение структуры донных отложений и их метаболизма, перенос растворенного кислорода, метана. Интенсивное развитие фитопланктона (на участке Плоски–Корчева численность фитопланктона достигала 111.668–302.790 млн кл/л по данным анализа проб с поверхности воды) стало причиной пересыщения воды кислородом: содержание кислорода в поверхностном слое достигало 11.3–17.6 мг/л в 2022 против 9.0–10.7 мг/л в 2021 г. Интенсивное развитие фитопланктона (цветение воды), привело к пересыщению водной массы кислородом, что активизировало процессы окисления метана и в результате снизило значения его удельного потока, особенно в нижней более глубоководной части водохранилища в районе урочища Корчева (с 224 до 23.0 мгС-СН₄/(м² сут) в 2021 и 2022 гг. соответственно). Поэтому высокие значения удельного потока (182 мгС-СН₄/(м² сут)) сохранились только в мелководном Шошинском плесе (см. табл. 3).

Соответствие наибольших значений потока метана характеру грунта прослеживается не во всех случаях. В прохладном 2020 г. наибольший поток метана был выявлен на верхнем участке Иваньковского водохранилища на станции Городня, где донные отложения представлены заиленным песком, в то время как на более глубоких станциях с илистым грунтом, содержащим больше ОВ, поток метана в атмосферу был незначителен, что было обусловлено хорошей аэрацией и окислением метана. Как показано выше, даже значительный выход метана из ДО при наличии бескислородных условий у дна, в условиях бурного цветения поверхностных горизонтов воды из-за окисления нивелируется, и поток метана значительно снижается.

В Рыбинском водохранилище в осенний период 2021 г. удельные потоки метана оказались ниже, чем в летний 2022 г. Повышенные значения удельного потока метана летом выявлены в приустьевых заливах притоков с заболоченными водосборами (более 1000 мгС-СН₄/(м² сут)), а также в приплотинной глубокой зоне (120–

Таблица 4. Удельный поток метана из водохранилищ умеренной зоны северного полушария по (Johnson et al., 2021) и диапазон измеренных значений в волжских водохранилищах ($\text{мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \text{сут})$)

Месяц	Водохранилища умеренной зоны по (Johnson et al., 2021)		Волжские водохранилища Суммарный измеренный поток*
	диффузионный поток	пузырьковый поток	
Апрель	5.6	70.4	Ледостав
Май	6.8	98.5	0.1–11.2
Июнь	8.5	140.6	2.5
Июль	7.9	126.6	Нет данных
Август	5.6	90.0	0.1–315
Сентябрь	2.9	45.0	0.7–16.5
Октябрь	5.6	70.4	Нет данных

Примечание. * Суммарный измеренный удельный поток включает пузырьковую и диффузионную составляющие.

140 $\text{мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \text{сут})$). Наибольшее содержание метана было характерно в период летней съемки в условиях отсутствия кислорода в придонной воде. Концентрации метана на глубинах более 16 м в приплотинных участках превышали 50 мкл/л, наибольшее значение составило 404 мкл/л (см. табл. 2).

В зимний период в большинстве водохранилищ содержание метана низкое (менее 10 мг/л с максимумом в придонном слое). В Черемшанском заливе Куйбышевского водохранилища зафиксированы концентрации метана до 133 мкл/л, в Рыбинском на станции Мать-Волга — 286 мкл/л. Повышенные концентрации в период ледостава говорят о том, что Рыбинское водохранилище может быть существенным источником выброса метана при разрушении ледяного покрова.

Водохранилища Волжского каскада, несмотря на некоторые различия термического и ледового режимов, относятся к умеренной зоне. Наиболее близкие значения удельного потока метана из волжских водохранилищ и водохранилищ, рассмотренных в работе (Johnson et al., 2021), приходятся на август (табл. 4). В мае–июне и сентябре фактические значения удельного потока в волжских водохранилищах значительно ниже. В апреле на большинстве волжских водохранилищ еще наблюдается ледостав, в то время как в работе (Johnson et al., 2021) указан отличный от нуля поток даже для водоемов бореальной зоны. В июле потоки могут быть аналогичными значениям в августе, а в октябре удельный поток метана скорее всего не превышает по значениям сентябрьский. В целом порядок измеренных значений удельного потока метана из волжских водохранилищ меньше, чем значений, приведенных для водохранилищ в работе (Johnson et al., 2021). Различия фактических измерений и опубликованной параметризации могут быть связаны с учетом в (Johnson et al., 2021) сезонности пузырькового и диффузионного потока по температуре воздуха, что не в полной мере отражает предикторы такого многофакторного и изменчивого во времени и пространстве процесса, как пузырьковая эмиссия.

ВЫВОДЫ

Исследование внутригодовых изменений содержания и эмиссии метана из волжских водохранилищ показало их значительную пространственно-временную изменчивость. Выявлены случаи содержания метана в придонных слоях водохранилищ, превышающие опубликованные ранее. Содержание метана в придонном слое более 200 мкл/л отмечено локально в заливах с низкой проточностью или на станциях при наличии бескислородных условий. Большие значения концентрации и удельного потока метана (десятки мкл/л и сотни $\text{мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \text{сут})$) наблюдаются только в период наличия стратификации. В условиях конвективно-ветрового перемешивания из-за аэрации водной толщи и окисления метана его удельный поток не превышает 20 $\text{мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \text{сут})$.

Во всех водохранилищах наблюдается значительная сезонная изменчивость удельного потока метана, связанная с особенностями синоптических условий конкретного года. При этом жаркая погода, вызывающая вспышки цветения воды, способствует снижению потока метана из-за его интенсивного окисления в условиях пересыщения поверхностного слоя кислородом. Снижение притока и проточности из-за малого количества осадков также способствует увеличению удельного потока метана.

В заливах Куйбышевского и Волгоградского водохранилищ, принимающих притоки с повышенной минерализацией, возможно усиление стратификации из-за плотностного расслоения и формирования зон с дефицитом кислорода в придонном горизонте воды. На таких участках возможно увеличение удельного потока метана, несмотря на относительно небольшое количество органического вещества в грунтах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Полевые исследования на Рыбинском, Куйбышевском и Волгоградском водохранилищах выполнены при поддержке ПАО РусГидро (договор 1010-416-2021 от 26.04.2021). Работы на Ивановском водохранили-

ще выполнены в рамках темы № FMWZ-2022-0002 “Разработка новых методических подходов к оценке гидроэкологического статуса водного объекта и его потенциала к самоочищению”, на Горьковском водохранилище в рамках темы АААА-А16-116032810054-3 “Гидрологический режим водных объектов суши в условиях изменения климата и антропогенного воздействия” и при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства “Приоритет 2030” ННГУ (№ темы Н-468-99_2021-2023). Пространственный анализ данных по концентрации метана в воде — в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

FUNDING

Field studies at the Rybinsk, Kuibyshev, and Volgograd reservoirs were carried out with the support of PJSC RusHydro (agreement 1010-416-2021 of April 26, 2021). The studies at the Ivankovsky reservoir were implemented within the framework of the topic no. FMWZ-2022-0002 “Development of New Methodological Approaches to Assessing the Hydroecological Status of a Water Body and Its Self-Purification Potential,” at the Gorky reservoir within the framework of the topic АААА16-116032810054-3 “Hydrological Regime of Inland Water Bodies under Climate Change and Anthropogenic Impact” and with the financial support of the Strategic Academic Leadership Program Priority 2030 of UNN (topic no. Н-468-99_2021-2023). Spatial analysis of data on methane concentration in water was completed within the framework of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Lomonosov Moscow State University “The Future of the Planet and Global Environmental Changes.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверина А.А., Антипов Н.Е., Виногоров А.А., Воловцов А.А., Головин 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 // Исследования молодых географов: сб. статей участников зимних студенческих экспедиций. М., 2022. С. 71–80.
- Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Факторы формирования концентраций метана в водных экосистемах. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2021. 366 с.
- Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ. Водохранилища Верхней Волги. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 290 с.
- ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ. М.: Стандартинформ, 2017.
- Гречушникова М.Г., Бадюков Д.Д., Саввичев А.С., Казанцев В.С. Сезонные и пространственные изменения содержания метана в Можайском водохранилище в летний период // Метеорология и гидрология. 2017. № 11. С. 67–78.
- Гречушникова М.Г., Доброхотова Д.В., Капустин И.А., Мольков А.А., Лещев Г.В. Исследование изменчивости гидроэкологических характеристик в приплотинном участке Горьковского водохранилища в 2022 году / Материалы 7-ой всероссийской науч. конф. “Проблемы экологии Волжского бассейна”. Нижний Новгород: ФГБОУ ВО Волжский гос. ун-тет водного транспорта, 2022. Т. 5. С. 1–6.
- Гречушникова М.Г., Репина И.А., Степаненко В.М., Казанцев В.С., Артамонов А.Ю., Ломов В.А. Эмиссия метана с поверхности долинного Можайского водохранилища // География и природные ресурсы. 2019. № 3. С. 77–85. [https://doi.org/10.21857/GIPR0206-1619-2019-3\(77-85\)](https://doi.org/10.21857/GIPR0206-1619-2019-3(77-85))
- Гречушникова М.Г., Ломова Д.В., Ломов В.А., Кременецкая Е.Р., Григорьева И.Л., Комиссаров А.Б., Федорова Л.П. Пространственно-временные различия гидроэкологических характеристик и эмиссии метана Ивановского водохранилища // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 81–89. <https://doi.org/10.31857/S0321059623010078>
- Гречушникова М.Г., Репина И.А., Степаненко В.М., Казанцев В.С., Артамонов А.Ю., Варенцов М.И., Ломова Д.В., Мольков А.А., Капустин И.А. Пространственно-временные изменения содержания и эмиссии метана в водохранилищах с различным коэффициентом водообмена // Изв. РГО. 2018. Т. 150. № 5. С. 14–33. <https://doi.org/10.7868/S086960711805002X>
- 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. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: Принтхаус, 2010. 174 с.
- 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. Цикл метана в грунтах водохранилищ Волжско-Камского каскада и его роль в деструкции органического вещества // Труды Ин-та биологии внутренних вод РАН. 2016. № 74 (77). С. 21–36.
- Елистратов В.В., Масликов В.И., Сидоренко Г.И., Молдцов Д.В. Выбросы парниковых газов с водохранилищ ГЭС: анализ опыта исследований и организация проведения экспериментов в России // Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). 2014. № 11. С. 146–159.
- Законнов В.В. Илонакопление в системе водохранилищ Волжского каскада // Труды Ин-та биологии внутренних вод РАН. 2016. Вып. 75 (78). С. 30–39.
- Иваньковское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.
- Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник). Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. 123 с.
- Лазарева В.И., Степанова И.Э., Цветков А.И., Пряничникова Е.Г., Перова С.Н. Кислородный режим водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата — последствия для зоопланктона и зоо-

- обентоса // Труды Ин-та биологии внутренних вод РАН. 2018. Т. 81 (84). С. 47–84.
- Литвинов А.С., Рошупко В.Ф. Многолетние и сезонные колебания уровня Рыбинского водохранилища и их роль в функционировании его экосистемы // Водные ресурсы. 2007. Т. 34. № 1. С. 33–40.
- Мартынова М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука, 2010. 243 с.
- Минеева Н.М., Семадени И.В., Макарова О.С. Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ р. Волги (2017–2018 гг.) // Биология внутренних вод. 2020. № 2. С. 205–208.
- Никаноров Ю.И. Ивановское водохранилище // Изв. ГосНИОРХ. 1975. Т. 102. С. 5–25.
- Репина И.А., Терский П.Н., Горин С.Л., Агафонова С.А., Ахмерова Н.Д., Василенко А.Н., Гречушников 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. Натурные измерения эмиссии метана на крупнейших водохранилищах России в 2021 г. начало масштабных исследований 2021 г. // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 6. С. 713–718.
<https://doi.org/10.31857/S0321059622060141>
- РусГидро. Годовой отчет. М.: Русгидро, 2008. 124 с.
- Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов-на-Дону—М.: Ростиздат, 2005. 329 с.
- Чистая энергия. Заволжье: Русгидро, 2020. 15 с.
- Шашуловский В.А., Мосияш С.С. Формирование биологических ресурсов Волгоградского водохранилища в ходе сукцессии его экосистемы. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 250 с.
- Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // Environ. Science and Technology. 2010. Vol. 44. № 14. P. 5450–5455.
<https://doi.org/10.1021/es1005048>
- Bastviken D., Tranvik L., Downing J., Crill P., Enrich-Prast A. Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink // USA: Science. 2011. Vol. 331. P. 6013–6063.
<https://doi.org/10.1126/science.1196808>
- Deemer B.R., Harrison J.A., Li S., Beaulieu J.J., Del Sontro T., Barros N., Bezerra-Neto J.F., Powers S.M., dos Santos M.A., Vonk J.A. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis // BioScience. 2016. Vol. 66. № 11. P. 949–964.
<https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>
- Dzjuban A.N. Microbiological processes of methane transformation and organic matter decomposition in bottom sediments of the reservoirs of the Volga and Kama rivers // Hydrobiological J. 2004. Vol. 40. № 4. P. 69–74.
<https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v40.i4.60>
- Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower // Nature. 2006. Vol. 444. P. 524–525.
<https://doi.org/10.1038/444524a>
- Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments. Environmental Science Series / A. Tremblay, L. Varfalvy, C. Roehm, M. Garneau (Eds.). NY: Springer, 2005. 732 p.
- Johnson M.S., Matthews E., Bastviken D., Deemer B., Du J., Genovese V. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs // J. of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. Vol. 126 (8). P. 1–19.
<https://doi.org/10.1029/2021JG006305>
- Li S., Zhang Q. Carbon emission from global hydroelectric reservoirs revisited // Environ. Science and Pollution Research. 2014. Vol. 21. P. 13636–13641.
<https://doi.org/10.1007/s11356-014-3165-4>
- Lima I., Ramos F., Bambace L., Rosa R. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective // Mitigation Adaptation Strategy Global Change. 2006. Vol. 13. P. 1381–1386.
<https://doi.org/10.1007/s11027-007-9086-5>
- Lomov V., Grechushnikova M., Kazantsev V., Repina I. Reasons and patterns of spatio-temporal variability of methane emission from the Mozhaysk Reservoir in summer period // E3S Web of Conferences IV Vinogradov Conference. 2020. № 163. Article 03010.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016303010>
- Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin E., Rudd J.W.M., Rosenberg D.M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate // Bioscience. 2000. Vol. 50. P. 766–775.
[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0766:RSASOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0766:RSASOG]2.0.CO;2)
- 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. Vol. 14. № 4. P. 225–230.
<https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2>

Methane Concentration and Fluxes in Volga River Reservoirs

M. G. Grechushnikova^{1, 2}, I. A. Repina^{1, 3, *}, N. L. Frolova^{1, 2}, S. A. Agafonova^{1, 2}, V. A. Lomov^{1, 2, 3}, D. I. Sokolov^{1, 2}, V. M. Stepanenko^{1, 2, 3}, V. A. Efimov^{1, 2}, A. A. Mol'kov⁴, and I. A. Kapustin⁴

¹Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

³Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

⁴Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

*e-mail: repina@ifaran.ru

The paper presents the results of methane flux and its concentration measurements in the reservoirs of the Volga cascade: Ivankovskoye, Rybinskoye, Gorkovskoye, Kuybyshevskoye, and Volgogradskoye reservoirs. The article summarizes the materials from the 2017–2023 seasonal observations archive. Measurements of

the gas flux were carried out by the floating chamber method, the methane concentration determination in the samples was carried out by the headspace method. The spatial and seasonal variability of both methane content and its emissions depending on the coefficient of water exchange, weather conditions, the nature of bottom sediments, and depth was revealed. High values of methane concentration and methane flux are observed in the presence of stratification, while during vertical mixing, the flux values decrease significantly. The highest methane flux values are characteristic of the heavily populated by macrophytes shallow Shoshinskiy reach of the Ivankovskoye reservoir (up to 334 mgC-CH₄/(m² day)), the flooded left bank floodplain of the Gorkovskoye reservoir (up to 548 mgC-CH₄/(m² day)), where they are associated with weak flow and intra-mold circulation, and also for Chesnava bay of the Rybinskoye reservoir (up to 1086 mgC-CH₄/(m² day)), associated with anthropogenic pollution and low flow rates. In the bays of Kuybyshevskoye and Volgogradskoye reservoirs that receive inflows with increased mineralization, stratification may increase due to density stratification, the formation of zones with oxygen deficit, and increase in methane flux despite the small amount of organic matter in sediments. The example of the Gorkovskoye reservoir shows the effect of the dam on the spatial structure of methane flux and concentration. Comparison with generalized data on specific methane flows from moderate water reservoirs showed that in the Volga cascade, these values are lower in all months of the open water period except August.

Keywords: methane, flux, reservoir, destruction, water exchange, flowering

REFERENCES

- Averina A.A., Antipov N.E., Vinogorov A.A., Volovodov A.A., Golovnin K.I., Kuznechenko I.A., Ovchinnikova O.V., Petrov N.A., Poluhin S.I., Sushincev I.M., Horosheva A.S., Efimov V.A., Lomov V.A., Frolova N.L. Assessment of the total methane content in the Rybinsk reservoir in winter and calculation of individual components of the methane balance. In *Issledovaniya molodykh geografov: sb. statei uchastnikov zimnikh studentcheskikh ekspeditsii* [Research by Young Geographers. Collection of Articles by Participants of Winter Student Expeditions]. Moscow: MGU, 2022, pp. 71–80. (In Russ.).
- Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. *Environ. Sci. Technol.*, 2010, vol. 44, no. 14, pp. 5450–5455. <https://doi.org/10.1021/es1005048>
- Bastviken D., Tranvik L., Downing J., Crill P., Enrich-Prast A. Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink. *USA: Science*, 2011, vol. 331, pp. 6013–6063. <https://doi.org/10.1126/science.1196808>
- Chistaya energiya* [Clean Energy]. Zavolzhye: Rushydro Publ., 2020. (In Russ.).
- Deemer B.R., Harrison J.A., Li S., Beaulieu J.J., Del Sontro T., Barros N., Bezerra-Neto J.F., Powers S.M., dos Santos M.A., Vonk J.A. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. *BioScience*, 2016, vol. 66, no. 11, pp. 949–964. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>
- Dzyuban A.N. Microbiological processes of organic matter circulation in bottom sediments of reservoirs of the Volga-Kama cascade. *Water Resour.*, 1999, vol. 26, no. 4, pp. 262–271. (In Russ.).
- Dzyuban A.N. Microbiological processes of methane transformation and organic matter decomposition in bottom sediments of the reservoirs of the Volga and Kama rivers. *Hydrobiol. J.*, 2004, vol. 40, no. 4, pp. 69–74. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v40.i4.60>
- Dzyuban A.N. *Destruktsiya organicheskogo veshchestva i tsikl metana v donnykh otlozheniyakh vnutrennikh vozdemov* [Destruction of Organic Matter and Methane Cycle in Bottom Sediments of Inland Reservoirs]. Yaroslavl: Printhouse Publ., 2010. 174 p.
- Dzyuban A.N. Methane and its transformation processes in water of some tributaries of the Rybinsk Reservoir. *Water Resour.*, 2011, vol. 38, pp. 615–620. <https://doi.org/10.1134/S0097807811050046>
- Dzyuban A.N. The methane cycle in the soils of reservoirs of the Volga-Kama cascade and its role in the destruction of organic matter. In *Tr. Inst. biologii vnutrennikh vod RAN. T. 77* [Proc. Inst. of Biology of Inland Waters RAS. Vol. 77], 2016, pp. 21–36. (In Russ.).
- Elistratov V.V., Maslikov V.I., Sidorenko G.I., Molodtsov D.V. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs: analysis of research experience and organization of experiments in Russia. *Altern. Energetica Ecol. (ISJAE)*, 2014, no. 11, pp. 146–159. (In Russ.).
- Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N., Khorochevskaya V.O. *Metan v vodnykh ekosistemakh* [Methane in Aquatic Ecosystems]. Rostov-on-Don; Moscow: Rostizdat Publ., 2005. 329 p.
- Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. *Faktory formirovaniya kontsentratsii metana v vodnykh ekosistemakh* [Factors of Formation of Methane Concentrations in Aquatic Ecosystems]. Rostov-on-Don: Southern Fed. Univ. Publ., 2021. 366 p.
- Gidrometeorologicheskii rezhim ozer i vodokhranilishch. Vodokhranilishcha Verkhnei Volgi* [Hydrometeorological Regime of Lakes and Reservoirs. Reservoirs of the Upper Volga]. Leningrad: Hydrometeoizdat Publ., 1975. 290 p.
- Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower. *Nature*, 2006, vol. 444, pp. 524–525. <https://doi.org/10.1038/444524a>
- GOST 23740-2016. Grunty. Metody opredeleniya soderzhaniya organicheskikh veshchestv* [State Standard 23740-2016. Soils. Methods for Determining the Content of Organic Substances]. Moscow: Standartinform Publ., 2017.
- Grechushnikova M.G., Badyukov D.D., Savvichev A.S., Kazantsev V.S. Seasonal and spatial changes in methane content in Mozhaik reservoir in summer. *Meteorol. Hydrol.*, 2017, no. 11, pp. 67–78. (In Russ.).
- Grechushnikova M.G., Dobrohotova D.V., Kapustin I.A., Mol'kov A.A., Leshchev G.V. Study of the variability of

- hydrological characteristics in the near-dam section of the Gorky reservoir in 2022. In *Materialy 7-oi vserossiiskoi nauch. konf. "Problemy ekologii Volzhskogo basseina". T. 5* [Proc. of the 7th All-Russian Sci. Conf. "Problems of Ecology of the Volga Basin". Vol. 5]. Nizhny Novgorod: Volga St. Univ. Water Transp., 2022, pp. 1–6. (In Russ.).
- Grechushnikova M.G., Repina I.A., Stepanenko V.M., Kazantsev V.S., Artamonov A.Yu., Lomov V.A. Methane Emission From the Surface of the Mozhaik Valley-Type Reservoir. *Geogr. Nat. Resour.*, 2019, vol. 40, pp. 247–255.
<https://doi.org/10.1134/S1875372819030077>
- Grechushnikova M.G., Lomova D.V., Lomov V.A., Kremetskaya E.R., Grigor'eva I.L., Komissarov A.B., Fedorova L.P. Space and Time Variations of Hydroenvironmental Characteristics of the Ivankovo Reservoir in Years with Different Weather Conditions. *Water Resour.*, 2023, vol. 50, pp. 109–116.
<https://doi.org/10.1134/S0097807823010074>
- Grechushnikova M.G., Repina I.A., Stepanenko V.M., Kazantsev V.S., Artamonov A.Yu., Varentsov M.I., Lomova D.V., Mol'kov A.A., Kapustin I.A. Spatial and temporal variations of methane content and emission in reservoirs with different water exchange coefficient. *Izv. Russ. Geogr. Obshch.*, 2018, vol. 150, no. 5, pp. 14–33. (In Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S086960711805002X>
- Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments. Environmental Science Series.* Tremblay A., Varfalvy L., Roehm C., Garneau M., Eds. N.Y.: Springer, 2005. 732 p.
- Ivan'kovskoe vodokhranilishche: Sovremennoe sostoyanie i problemy okhrany* [Ivankovskoe Reservoir: Current State and Problems of Protection]. Moscow: Nauka Publ., 2000. 344 p.
- Johnson M.S., Matthews E., Bastviken D., Deemer B., Du J., Genovese V. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2021, vol. 126, no. 8, pp. 1–19.
<https://doi.org/10.1029/2021JG006305>
- Kuibyshevskoe vodokhranilishche (nauchno-informatsionnyi spravochnik)* [Kuibyshev Reservoir (Scientific Information Guide)]. Tolyatti: IEVB RAS Publ., 2008. 123 p.
- Lazareva V.I., Stepanova I.E., Tsvetkov A.I., Pryanichnikova E.G., Perova S.N. Oxygen regime of the Volga and Kama reservoirs during the period of climate warming — consequences for zooplankton and zoobenthos. In *Tr. Inst. biologii vnutrennikh vod RAN. T. 84* [Proc. Inst. of Biology of Inland Waters RAS. Vol. 84], 2018, pp. 47–84. (In Russ.).
- Li S., Zhang Q. Carbon emission from global hydroelectric reservoirs revisited. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2014, vol. 21, pp. 13636–13641.
<https://doi.org/10.1007/s11356-014-3165-4>
- Lima I., Ramos F., Bambace L., Rosa R. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, 2006, vol. 13, pp. 1381–1386.
<https://doi.org/10.1007/s11027-007-9086-5>
- Litvinov A.S., Roshhupko V.F. Long-term and seasonal water level fluctuations of the Rybinsk Reservoir and their role in the functioning of its ecosystem. *Water Resour.*, 2007, vol. 34, pp. 27–34.
<https://doi.org/10.1134/S0097807807010034>
- Lomov V., Grechushnikova M., Kazantsev V., Repina I. Reasons and patterns of spatio-temporal variability of methane emission from the Mozhaik Reservoir in summer period. *E3S Web of Conf. IV Vinogradov Conf.*, 2020, no. 163, article 03010.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016303010>
- Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin E., Rudd J.W.M., Rosenberg D.M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere, and their surface areas have increased to the point where they should be included in global inventories of anthropogenic emissions of greenhouse gases. *BioScience*, 2000, vol. 50, no. 9, pp. 766–775.
[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0766:RSASOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0766:RSASOG]2.0.CO;2)
- Martynova M.V. *Donnye otlozheniya kak sostavlyayushchaya limnicheskikh ekosistem* [Bottom Sediments as a Component of Limnic Ecosystems]. Moscow: Nauka Publ., 2010. 243 p.
- Mineeva N.M., Semadeny I.V., Makarova O.S. Chlorophyll Content and the Modern Trophic State of the Volga River Reservoirs (2017–2018). *Inland Water Biol.*, 2020, vol. 13, pp. 327–330.
<https://doi.org/10.1134/S199508292002008X>
- Nikanorov Yu.I. Ivankovskoe reservoir. *Izv. GosNIOH*, 1975, vol. 102, pp. 5–25. (In Russ.).
- 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.N., Lomov V.A., Mishin D.V., Sazonov A.A., Stepanenko V.M., Sokolov D.I., Timoshenko A.A., Frolova N.L., Shesterkin V.P. Field Measurements of Methane Emission at Largest Reservoirs in Russia in 2021. The Start of Large-Scale Studies. *Water Resour.*, 2022, vol. 49, pp. 1003–1008.
<https://doi.org/10.1134/S0097807822060148>
- Rosentreter J.A., Borges A.V., Deemer B.R., Holgerson M.A., Liu S., Song C., Eyre B.D. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nat. Geoscience*, 2021, vol. 14, no. 4, pp. 225–230.
<https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2>
- RusGidro. Godovoi otchet* [RusHydro. Annual Report]. Moscow: Rushydro Publ., 2008. 124 p.
- Shashulovskij V.A., Mosiyash S.S. *Formirovanie biologicheskikh resursov Volgogradskogo vodokhranilishcha v khode suktsessii ego ekosistemy* [Formation of Biological Resources of the Volgograd Reservoir during the Succession of its Ecosystem]. Moscow: Tovar. Nauch. Izdan. KMK Publ., 2010. 250 p.
- Zakonnov V.V. Silt accumulation in the reservoir system of the Volga cascade. In *Tr. Inst. biologii vnutrennikh vod RAN. T. 78* [Proc. Inst. of Biology of Inland Waters RAS. Vol. 78], 2016, pp. 30–39. (In Russ.).