



УДК 556

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ МЕТАНА В КУЙБЫШЕВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

**Репина Ирина Анатольевна**, д.ф.-м.н., заведующая лабораторией взаимодействия атмосферы и океана  
Институт физики атмосферы Российской академии наук  
109017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3.

**Агафонова Светлана А.**, к.г.н., старший научный сотрудник МГУ имени М.В.Ломоносова,  
119991, Российская Федерация, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова, Географический факультет

**Мольков Александр Андреевич**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела радиофизических методов в гидрофизике ИПФ РАН, старший научный сотрудник кафедры ГТК и ЭБС ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

**Мишин Денис Валерьевич**, младший научный сотрудник, ФГБУ "Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова"  
119034, Москва, Кропоткинский пер., д.6

**Ермаков Станислав Александрович**, д.ф.-м.н., заведующий отделом радиофизических методов в гидрофизике ИПФ РАН, заведующий кафедрой ГТК и ЭБС ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

*Аннотация. В работе представлены результаты измерения потоков метана в Куйбышевском водохранилище. Работы проведены в августе 2021 г. при стабильных метеорологических и гидрологических условиях на 10 станциях, расположенных на участке от Зеленодольска до Тольятти. Наименьшие концентрации метана и его поток зарегистрированы в Камском устье, а максимальные - вблизи городов Ульяновск и Тольятти, и в Черемшанском заливе.*

*Ключевые слова: Куйбышевское водохранилище, водохранилища, метан, эмиссия метана*

### Введение

Внутренние водоемы, под которыми мы понимаем озера и водохранилища, - природные системы, чувствительные к изменениям климата и при этом играющие

непосредственную роль в этих изменениях. В значительной степени такое двустороннее влияние определяется биохимическими примесями, среди которых особую роль играют растворенные газы, в частности, парниковые: метан и углекислый газ. Метан не самый сильный парниковый газ в атмосфере, его концентрации в среднем меньше 1%, но его потенциал глобального потепления очень высок – 28 по отношению к диоксиду углерода за 20 летний период [1]. Поэтому даже небольшое изменение его атмосферной концентрации может привести к значимым последствиям и усилению парникового эффекта. К природным источникам метана относятся – болота, мировой океан, газогидратные образования, выбросы при вулканических извержениях и другие [2, 3] Основные антропогенные источники метана – это крупный рогатый скот, рисовые поля, свалки бытовых и промышленных отходов [4]. В основном метан попадает в атмосферу при разложении органического вещества в отсутствие кислорода, так как при бескислородных условиях он – конечный продукт деструкции органических соединений. Такие процессы происходят в том числе в природных водоемах, в частности – в водохранилищах. Оценок эмиссии метана с водохранилищ мира достаточно много, при этом они сильно различаются между собой - от 2 до 122 Тг/год. Такое существенное различие связано с тем, что разные оценки проводились в разное время и в них учитывались разные базы данных по измерениям потоков метана с искусственных водоемов. Кроме того, различались и методы группировки водохранилищ для определения среднего значения и его экстраполяции на неизученные водоемы. Наиболее актуальная и современная оценка была дана коллективом авторов [5] по большой базе данных измерений эмиссии метана с водохранилищ, в которую включены оценки потоков со 160 водохранилищ. Годовая эмиссия метана по этим данным составляет 17.7 Тг. В целом в мире очень немного водоемов с накопленными рядами данных по значениям потоков метана, а в России они практически отсутствуют. И для более ясного понимания процессов газообмена необходимо проводить полевые исследования на хорошо изученном водном объекте с хорошо известной гидрологической структурой.

Одной из задач также является изучение влияние на газообмен пленок поверхностно-активных веществ биогенной природы, практически повсеместное присутствие которых на поверхности водохранилищ, озер и пр. связано с биологическими процессами, в частности, жизнедеятельностью биоты и прежде всего фитопланктона, в летний и частично весенний и осенний сезоны. Биогенные пленки поверхностно-активных веществ содержат в своем составе длинные органические молекулы с гидрофобными и гидрофильными концевыми группами и в силу этого образуют на поверхности воды пленку, обладающую упругими свойствами – своего рода упругую мембрану. Вполне ожидаемо, что такие пленки изменяют режим газообмена между водными массами и атмосферой. Влияние пленок на газообмен в океанских условиях исследовалось в ряде работ [6-8], что касается внутренних водоемов, то сколько-нибудь систематические исследования нам не известны. Поэтому в данной работе сделана попытка провести соответствующие наблюдения на примере Куйбышевского водохранилища в районах интенсивного цветения сине-зеленых водорослей (биогенные пленки), а также в зоне городских стоков и в районах бункеровки судов (антропогенные пленки).

Куйбышевское водохранилище – самое крупное долинное водохранилище в Европе, вытянуто преимущественно с севера на юг, расположено на территории Республики Татарстан, Республики Марий Эл, Чувашской Республики, Ульяновской и Самарской областей (рис. 1) [9, 10]. Расстояние между створами Жигулевского гидроузла и Чебоксарского гидроузла (вышерасположенного) по водотоку р. Волги составляет 430 км. Средняя глубина водоёма 8,9 м, максимальная – 40 м. Наибольшей ширины оно достигает на участке пгт. Лаишево – р.п. Камское устье (до 40 км) и в Верхне-Ульяновском плесе (до 27 км).

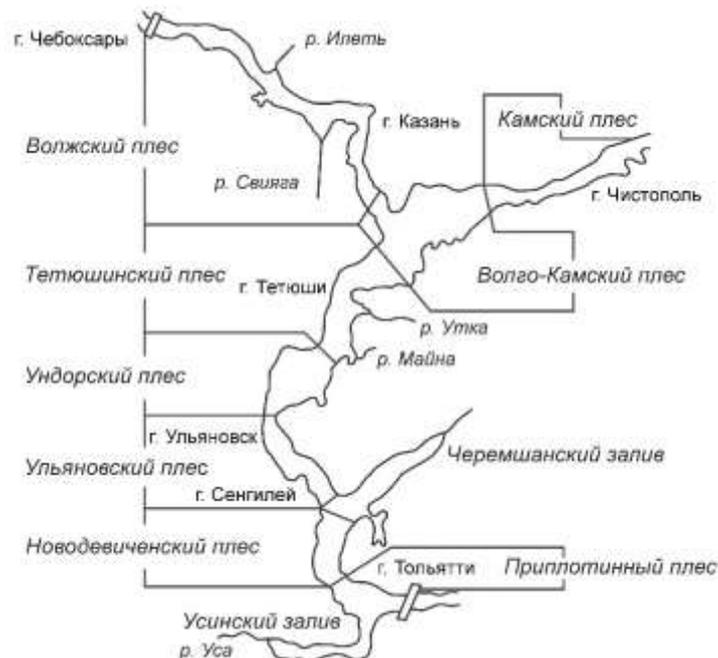


Рис.1. Схема Куйбышевского водохранилища

### Район и условия проведения работ

В 2021 году половодье в бассейне Волги прошло в условиях средней водности. В апреле 2021 года боковой приток воды в Куйбышевское водохранилище составил 95% от среднеголетних значений, в мае - 102,5% нормы [11]. Согласно действующим правилам использования водных ресурсов Куйбышевского водохранилища режим работы гидроузла в летне-осенний период определяется требованиями, прежде всего, водного транспорта [12]. В летние месяцы уровни воды в верхнем бьефе водохранилища оставались в диапазоне 51,30–53,16 м БС. Сбросные расходы воды Жигулевского гидроузла – от 4470 до 10500 м<sup>3</sup>/с. Работы проводились 15-19 августа 2021 г. на участке от Печищи (напротив г.Зеленодольск) до г.Тольятти в солнечную безветренную погоду при стабильных режимах работы гидротехнических сооружений (рис. 2, табл. 1). В это время на озерной части водохранилища ниже Камского устья наблюдалось интенсивное цветение сине-зеленых водорослей и замор рыб в воде и на берегу.

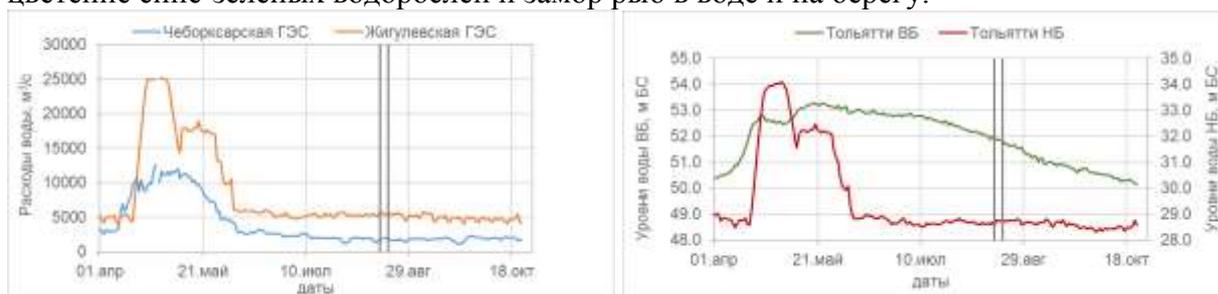


Рис.2. Гидрометеорологические условия за 15-19 августа на Куйбышевском водохранилище

Таблица 1

### Гидрометеорологические условия за 15-19 августа на Куйбышевском водохранилище

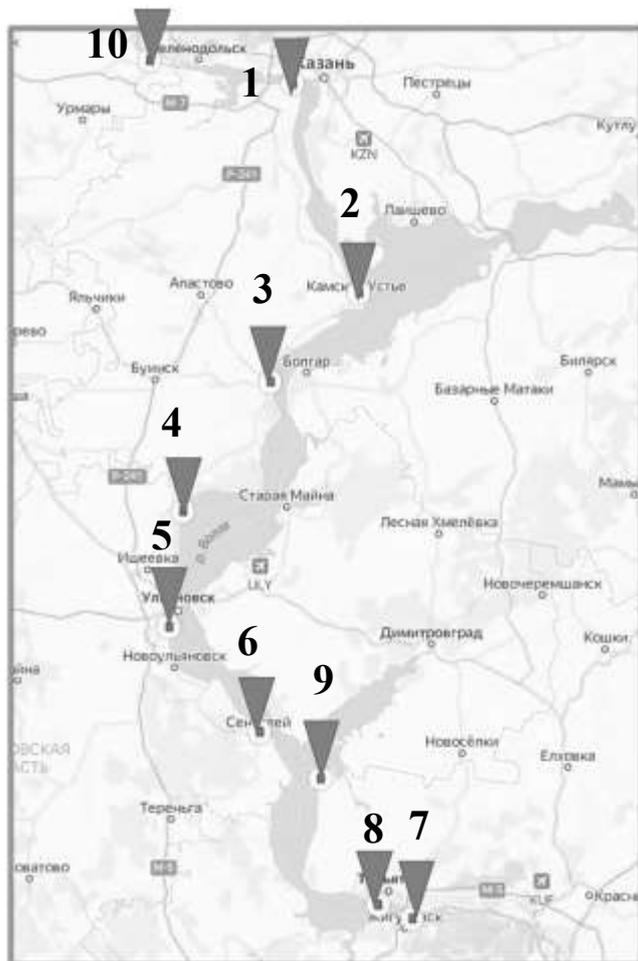
Параметр	Значение параметра
Расход воды	
Чебоксарский гидроузел	от 1860 до 2000 м <sup>3</sup> /с
Жигулевский гидроузел	от 5390 до 5873 м <sup>3</sup> /с
Уровень воды, м	

Верхний Услон	от 51,82 до 51,74 м БС
Ульяновск	от 51,93 до 51,77 м БС
Тольятти (верхний бьеф)	от 51,98 до 51,85 м БС
Тольятти (нижний бьеф)	от 28,57 до 28,70 м БС
Температура воздуха	
Казань	от 20,6 до 28,1 <sup>0</sup> С
Ульяновск	от 20,8 до 26,1 <sup>0</sup> С
Тольятти	от 23,1 до 28,3 <sup>0</sup> С

### Методы и подходы

Работы проводились на станциях с борта надувной моторной лодки “Линда Л-260” марки “Дэка”, перевозимой на крыше личного автомобиля между станций. Расположение станций представлено на рис. 3. Всего было сделано 10 станций, 7 из которых (с.1-6, ст.10) расположены на русле под правым берегом, одна (ст.7) – сразу под Жигулевской ГЭС и две – по левому берегу (ст. 8, 9). При планировании расположения станций съемки выбирались точки в русловой части водохранилища таким образом, чтобы охватить каждый плес. По правому берегу дорога, особенно верхней и средней части водохранилища довольно близко проходит к берегу. Рядом с населенными пунктами имеются пляжи, причалы или оборудованные съезды к воде.

Моторная лодка была оборудована подвесным мотором Suzuki DF2.5 и картплоттером Garmin EchoMap 50s для регистрации географических координат станции, глубины и контроля температуры воды у поверхности. По достижению максимальной глубины, лодка фиксировалась якорем. Вертикальные профили температуры воды, содержания кислорода, концентрации хлорофилла “а” регистрировались путем зондирования СТД-зондом YSI Echo 2, дополнительно оборудованного соответствующими датчиками. На каждой станции производился отбор проб на содержание метана в воде, а также установка плавучих камер для определения общего потока метана на границе «вода-атмосфера». Более подробно методика измерений изложена в [13, 14]. Всего отобрано 95 проб, из них 25 – пробы воды, 60 – пробы с камер и 10 проб воздуха. Наличие стратификации не ожидалось, поэтому на каждой станции пробы воды отбирали у поверхности и у дна, при больших глубинах также на середине. Для всех точек, кроме т. 1 две камеры устанавливали на «чистую» водную поверхность, одну – на пленку из растительного масла. Техника постановки была следующая. По одному борту лодки устанавливались две камеры на чистую поверхность. С другого борта точно и мгновенно из бутылки выливалось небольшое количество масла (порядка 20-200 мл), после чего максимально оперативно устанавливалась третья камера, с тем чтобы минимизировать процесс растекания масла по водной поверхности. На бутылке отмечалась риска, соответствующая объему вылитого масла, который позднее использовался для пересчета в толщину пленки через площадь камеры. При этом маслом, успевшим растечься за пределы камеры, пренебрегалось, а пленка считалась однородной по толщине.



- Станции:
- ст.1 Верхний Услон (Печищи)
  - ст.2 Камское устье
  - ст.3 Тетюши
  - ст.4 Ундоры
  - ст.5 Ульяновск (Винновская роща)
  - ст.6 Сенгелей
  - ст.7 Жигулевск НБ
  - ст.8 Тольятти
  - ст.9 Черемшанский залив (Хрящевка)
  - ст.10 Волжск (Козловка)

Рис.3. Схема расположения станций на Куйбышевском водохранилище

## Результаты

В таблице 2 представлены результаты анализа проб воды и натурных измерений.

Для верхней части водохранилища (до ст. Тетюши) содержание кислорода в поверхностном слое составило 7–8 мг/л, причем эти значения, как и температура мало менялись с глубиной. Наиболее выраженные изменения с глубиной как температуры, так и кислорода отмечалось на ст. Ундоры, Ульяновск и Черемшанский залив. Для перечисленных станций ход концентраций кислорода в приповерхностном слое имеет клинообразную форму.

По концентрации метана в поверхностном слое относительно низкие значения (8 мклСН<sub>4</sub>/л и менее) отмечались практически на всех станциях, кроме ст. Ульяновск, Тольятти и Черемшанский залив. При этом на станциях 2 и 6 отмечено 2-3 кратное увеличение концентрации метана у дна по сравнению с поверхностью, а на станциях 3 и 7 – концентрации у дна и у поверхности близки.

Наибольшие значения потока метана в мгС/(м<sup>2</sup>·час) наблюдались в нижнем бьефе Жигулевского гидроузла и в Черемшанском заливе. Станции, схожие по значению концентрации метана в поверхностном слое (Ульяновск и Тольятти) таких же высоких значений потока не давали. Интересно отметить, что наблюдаемые у дна на станции 9 концентрации метана на 3 порядка выше, чем на любой другой станции. Точка 9 расположена в устье Черемшанского залива, в поселке Хрящевка, на левом берегу, от акватории Куйбышевского водохранилища отгорожена полуостровом Песчаный мыс и пирсом (пристанью). Выше по течению – Сусуканский залив, перекрытый дамбой для разведения рыбы. Акватория Сусуканского залива рассечена на прямоугольники, торчат стволы бывших берез. Возможно, интенсивные процессы гниения, наличие питательных

кормов для рыбы в воде и слабая проточность района служат причиной наблюдения высоких значений концентраций метана на этой станции.

При наличии пленки зарегистрированные потоки метана меняются. В большинстве случаев поток уменьшается на 30%-50%, однако на ст. 5 – поток вырос в 3 раз, на ст. 6 – упал в 9–13 раз, а на ст. 9 вырос в 7-18 раз. Разброс значений для станции в Черемшанском заливе вероятно связан с наличием пузырькового потока. Потоки метана как без пленки, так и в ее присутствии менялись более чем на порядок величин. В то же время, значения относительного потока (отношение потока с пленкой к потоку для чистой воде) менялось в меньших пределах и варьировалось в диапазоне 0.2-0.9 (кроме ст. 5 и 9, где относительный поток оказался больше 1).

Если рассматривать зависимость относительного потока от толщины пленки, то следует напомнить, что пленки растительного масла не образуют сплошной слой постоянной толщины, а представляют собой мономолекулярный слой с каплями макроскопической толщины (до 3-4 мм). При изменении средней толщины пленки в пределах, указанных в таблице 1, меняется фактически лишь относительная площадь капельной фазы, которая в большинстве описанных экспериментов не превышала 30%. Поэтому можно полагать, что изменение потока метана в присутствии пленки при изменении ее средней толщины в указанных пределах в основном определялось мономолекулярной фазой. С этим, возможно, и связана слабая чувствительность относительного потока к изменению средней толщины пленки.

Таблица 2

**Концентрации и потоки метана за 15-19 августа на Куйбышевском водохранилище**

Номер и название станции	Концентрации и кислорода на поверхности, мг/л	Концентрации метана, мклСН <sub>4</sub> /л		Поток метана, мгС/м <sup>2</sup> *час	Оценочная толщина пленки, мм
		на поверхности	у дна		
1. Печищи (напротив г. Казань)	8,0	8,0	8,2	2,0 – 2,7	
2. Камское устье	0,5	0,5	1,6	0,17–0,20 (0,10 в слике)	2,41
3. Тетюши	5,0	5,0	4,3	0,3 – 0,9 (0,1 в слике)	0,74
4. Ундоры	7,0	7,0	11,9	1,7–3,0 (1,3 в слике)	0,14
5. Ульяновск	13,6	13,6	26,4	0,07–0,11 (0,3 в слике)	0,74
6. Сенгилей	3,6	3,6	5,8	0,9–1,3 (0,1 в слике)	1,19
7. Жигулевск (нижний бьеф)	4,0	4,0	4,2	3,2–3,4 (2,9 в слике)	0,66
8. Тольятти (верхний бьеф)	15,2	15,2	18,0	0,2–0,7 (0,3 в слике)	0,29
9. Черемшанский	15,8	15,8	5074	5,3–14,7	0,89

залив				(98,5 в слике)	
10. Козловка напротив г. Зеленодольск)	3,8	3,8	9,2	1,4–1,8 (1,2 в слике)	0,58

### Выводы

Проведенные измерения концентрации и потока метана на Куйбышевском водохранилище позволили получить начальные сведения о пространственной неоднородности распределения этих характеристик по акватории и влиянии поверхностных пленок на изменчивость потока метана через границу “воздух-вода”. Планируется продолжать подобные съемки в разные сезоны года. Также планируется охватить наблюдениями Камский и Волжско-Камский плес и основные притоки водохранилища. По результатам измерений наибольший интерес для детальной съемки представляет акватория верхнего бьефа и Черемшанского залива.

Работа выполнена при поддержке гранта РГО "Экспедиция Плавающий университет Волжского бассейна" №17\_2021-Р и НИР в рамках договора 1010-416-2021 с ПАО «Русгидро»

### Список литературы:

1. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P. et al. Changes in atmospheric constituents and in Radiative Forcing // In: Asses. Report of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge. — 2007. — P.129–217.
2. Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М., Соловьева М.А. и др. Открытие новой гидратоносной структуры на дне оз.Байкал // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2015. — № 5. — С. 111–116.
3. Giavarini C., Hester K. Environmental Issues with Gas Hydrates // Gas Hydrates, Green Energy and Technology. — 2011. — P. 159 – 172.
4. Ehhalt D.H. The atmospheric cycle of methane // Tellus. — 1973. — V. 24. — P. 58–70.
5. Deemer B., Harrison A., Li S., Beaulieu J., Delsontro T. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis // BioScience. — 2016. — V. 66. — № 11. — P. 949–964
6. Pereira R., Ashton I., Sabbaghzadeh B. et al. Reduced air–sea CO<sub>2</sub> exchange in the Atlantic Ocean due to biological surfactants // Nature Geoscience. — 2018. — V.11. — P. 492–496.
7. Frew N. M., Goldman J. C., Dennett M. R. & Johnson A. S. Impact of phytoplankton-generated surfactants on air–sea gas-exchange // J. Geophys. Res. Oceans. — 1990. — V.95. — P. 3337–3352.
8. Salter M. E. et al. Impact of an artificial surfactant release on air–sea gas fluxes during Deep Ocean Gas Exchange Experiment II // J. Geophys. Res. Oceans. — 2011. — V. 116. — P. C11016.
9. Куйбышевское водохранилище. – Л.: Наука, 1983. – 214 с.
10. Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник) – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. – 123 с.
11. Русгидро. Жигулевская ГЭС. <http://www.zhiges.rushydro.ru/>.
12. Основные правила использования водных ресурсов Куйбышевского водохранилища на р. Волге. М. 1983. – 23 с.
13. Гречушникова М.Г., Репина И.А., Степаненко В.М., Казанцев В.С., Артамонов А.Ю., Ломов В.А. Эмиссия метана с поверхности долинного водохранилища // География и природные ресурсы. — 2019. — № 3. — С. 77–85.
14. Руководящий документ. Массовая концентрация метана и диоксида углерода в приземном слое атмосферного воздуха. Методика измерений методом газовой хроматографии РД 52.44.816-2015

## RESULTS OF METHANE FLOW MEASUREMENT IN THE KUIBYSHEVSK RESERVOIR

Irina A. Repina, Svetlana A. Agafonova, Alexander A. Molkov, Denis V. Mishin and Stanislav A. Ermakov

*Abstract. The paper presents the results of measuring methane fluxes in the Kuibyshev reservoir. The work was carried out in August under stable meteorological and hydrological conditions at 10 stations located from Zelenodolsk to Toll'yatti. The lowest methane concentrations and its flux were registered in the Kama mouth, and the maximum ones - near the cities Ulyanovsk and Toll'yatti, and in the Cheremshansky Bay.*

*Keywords: Kuibyshev reservoir, methane, methane flow*