

О связи потока гидрокарбонатного углерода со дна долинного водохранилища с гидрологической структурой водной толщи*

Д. В. Ломова¹, Е. Р. Кременецкая¹, М. Г. Гречушников^{1,2},
Л. Е. Ефимова², В. А. Ломов²

¹ Институт водных проблем Российской академии наук,
Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Губкина, 3

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

Для цитирования: Ломова, Д. В., Кременецкая, Е. Р., Гречушников, М. Г., Ефимова, Л. Е., Ломов, В. А. (2021). О связи потока гидрокарбонатного углерода со дна долинного водохранилища с гидрологической структурой водной толщи. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 66 (1), 61–73. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.104>

Круговорот углерода в водоемах — основополагающий процесс цикла биогенных элементов в водных экосистемах. На сегодняшний день наименее изученным звеном круговорота углерода является выделение углерода из донных отложений. В работе исследована интенсивность потоков HCO_3^- из грунтов водохранилища долинного типа и выявлена их связь с гидрологической структурой водной толщи. Натурные исследования и лабораторные эксперименты проведены на Можайском водохранилище в 2017–2019 гг. Данные годы различались погодными условиями, уровнем режимом и устойчивостью водной толщи. Для изучения обменных процессов использован метод трубок Кузнецова — Романенко. Интенсивность потока гидрокарбонатного углерода из донных отложений в воду может варьировать в значительных пределах (от 50 до 900 мгС/м²сут) в зависимости от положения станции исследований. При сопоставлении величин потоков HCO_3^- с гидрологической структурой всей водной толщи водоема было выявлено, что в глубоководных (более 8 м) районах выход HCO_3^- в значительной мере связан со степенью стратификации водной толщи и толщиной однородного гипolimниона, в пределах которого могут развиваться сейши и придонные компенсационные течения, способствующие трансседиментации донных отложений пойменных участков и аккумуляцией их в русловой ложбине. На неглубоких (менее 8 м) участках водохранилища наибольшее влияние на величину потока гидрокарбонатного углерода из донных отложений в воду оказывает количество осаждающегося на дно автохтонного органического вещества, связанного с развитием и отмиранием фитопланктона. Взаимосвязь потока HCO_3^- с содержанием органического вещества в грунте и его гирокоспической влажностью незначительна.

Ключевые слова: донные отложения, гидрокарбонатный углерод, стратификация, водохранилище.

* Работа выполнена в рамках темы АААА-А16-116032810054-3 «Гидрологический режим водных объектов суши в условиях изменения климата и антропогенного воздействия» (ГЗ), полевые работы поддержаны грантом РФФИ № 18-05-01066.

1. Введение

Эвтрофирование природных вод, прослеживающееся по всему миру, приводит к интенсификации круговорота органического вещества (ОВ) и связанных с ним биогенных веществ, в том числе углерода, в водных объектах. Растет поступление на дно органического вещества и связанных с ним биогенных элементов, интенсифицируются процессы деструкции. В результате изменяются окислительно-восстановительные условия среды, увеличивается содержание подвижных форм элементов, что может приводить к вторичному загрязнению ими водной толщи. Интенсивность деструкции ОВ в донных отложениях (ДО) оценивают по суммарному выходу из них углерода (растворенного в виде гидрокарбонатов), в виде газов (CO_2 и CH_4) и в составе растворенного органического вещества (Дзюбан, 2010). Упрощенная схема трансформаций соединений углерода в системе «вода — донные отложения» представлена на рис. 1. Данная работа посвящена изучению потока HCO_3^- из донных отложений в воду.

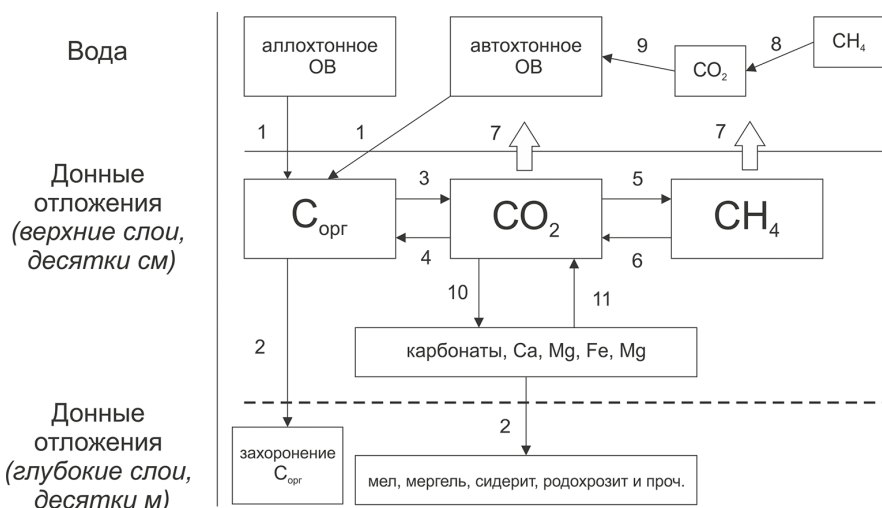
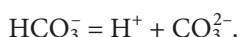
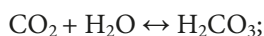


Рис. 1. Упрощенная схема круговорота углерода в системе вода — донные отложения: 1 — седиментация, 2 — захоронение, 3 — минерализация (анаэробное окисление), 4 — гетеротрофная фиксация, 5 — метаногенез, 6 — метаноокисление (анаэробное), 7 — поток в воду, 8 — метаноокисление (аэробное), 9 — фотосинтез, 10 — образование карбонатов, 11 — частичное растворение карбонатов. Составлено по (Мартынова и др., 2017)

Углерод может находиться в поровом растворе донных отложений в виде угольной кислоты, как диссоциированной, так и недиссоциированной (Golterman, 1975):



При значениях pH илов в диапазоне от 6.5–7.8 до 9.8 % растворенного углерода (карбонатного цикла) представлено формой HCO_3^- (Golterman, 1975).

В работе (Мартынова, 2010) было показано, что хотя послойное распределение гидрокарбонатов в поровом растворе озер имеет значимую связь с послойным распределением в твердой фазе илов CaCO_3 и O_2 , поток HCO_3^- из илов формируется в верхних миллиметрах, и изменения его величины регулируются интенсивностью аэробной деструкции в верхнем слое отложений.

Содержание O_2 в водоемах (в водной массе и в донных отложениях) определяется продукционно-деструкционными процессами, притоком O_2 с водосбора, активностью их трансформации в водоеме и размером выноса со стоком. Соотношение этих факторов изменяется во времени и пространстве и зависит от гидрологического режима водоема и погодных условий, которые могут быстро меняться. Накопление O_2 в донных отложениях происходит в результате осаждения содержащейся в водной толще органики. Интенсивность потока органического вещества ко дну во многом зависит от гидрологической структуры всей водной толщи, в частности от ее устойчивости к перемешиванию, приводящей к обособлению гипolimниона, а также от толщины гипolimниона (Кременецкая и др., 2018). Кроме того, при наличии температурной стратификации в водоеме в гипolimнионе могут формироваться аноксидные условия, приводящие к развитию анаэробных процессов в донных отложениях (Мартынова, 2010). В работе (Ломова и др., 2016) показано, что интенсивность деструкции O_2 в донных отложениях не зависит от возраста водоема, который определяет продуктивность его экосистемы и запас O_2 в грунтах. Большую значимость имеет стратифицированность водной толщи, определяемая синоптической ситуацией.

В данной работе на основе натурных и лабораторных исследований рассматривается изменение потоков HCO_3^- из донных отложений в связи с гидрологической структурой всей водной толщи, а не только придонного слоя воды.

2. Объект исследования, материалы и методы

Исследования потоков гидрокарбонатного углерода ($\text{F}(\text{HCO}_3^-)$), связанных с деструкцией O_2 в донных отложениях, проводились на Можайском водохранилище в период летней стратификации в 2017–2019 гг.

Можайское водохранилище расположено в верховьях р. Москвы в 120 км к северо-западу от г. Москвы. Водохранилище вытянуто с северо-запада на юго-восток, имеет извилистую береговую линию. Оно было создано в 1961 г., и в настоящий момент донный комплекс находится в устойчивом равновесии, по площади довольно однороден и не испытывает влияния коренных пород. Содержание карбонатов в илах не превышает 2–3 % (Мартынова и Шмидеберг, 1973). Его ложе состоит из двух отрицательных форм рельефа — участка четкообразной долины с широким дном и врезанной в него извилистой русловой ложбиной (Комплексные..., 1979), которая является зоной аккумуляции O_2 . Глубина по русловой ложбине увеличивается от верховьев к плотине от 5–7 до 20–22 м при НПУ. Водохранилище состоит из морфометрически подобных участков (плесов). В нем наблюдается температурная стратификация водной толщи на протяжении большей части летнего периода, свойственная глубоководным водохранилищам со слабым водообменом.

Длина водохранилища составляет 28 км (43 км по затопленному руслу реки); площадь при НПУ (183 м абс.) — 30.7 км²; объем — 0.24 км³; максимальная глу-

бина — 22 м, ширина — до 2.6 км; средний размах колебаний уровня воды в течение года — 6 м. Наполнение полезного объема происходит в апреле-мае, летом и зимой водохранилище срабатывается. Годовой коэффициент водообмена равен в среднем 1.8 год^{-1} (Комплексные..., 1979).

Изучение характеристик экосистемы Можайского водохранилища основывалось на данных квазисинхронных гидролого-гидрохимических и грунтовых съемок. На опорных станциях, расположенных в характерных районах водохранилища (рис. 2), производились измерения температуры воды с шагом в 1 м, прозрачности воды по диску Секки, дночерпателем Экмана отбирался ненарушенный верхний слой грунта толщиной до 15 см для определения в нем содержания ОВ и гигроскопической влажности, из него же стеклянными трубками вырезались колонки илов для постановки экспериментов по оценке выхода HCO_3^- . Кроме того, отбирались пробы в придонной воды для определения деструкции ОВ (Винберг, 1960).

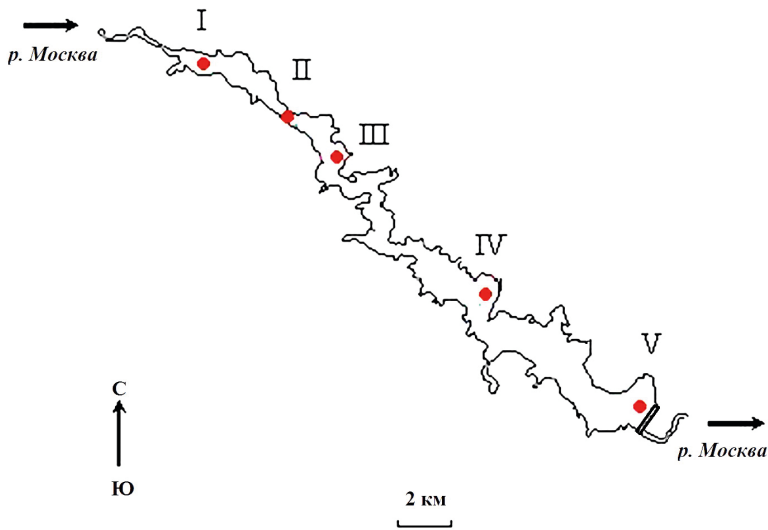


Рис. 2. Схема Можайского водохранилища (римскими цифрами обозначены опорные станции отбора проб)

На сегодняшний момент существуют три основных способа оценки величин массо- и газообмена на границе между водой и донными отложениями:

- использование донных камер, которые устанавливаются на дно водоема (величина потока в таком случае определяется как разница концентраций вещества в камере в начале и конце экспозиции в пересчете на площадь дна);
- расчет величины потока по градиенту концентраций вещества в придонной воде и поровом растворе;
- использование метода трубок (на экспозицию выставляются две трубки: содержащая ненарушенную колонку донных отложений и заполненная только придонной водой без грунта). По разнице концентраций вещества в трубке с грунтом и «холостой» трубке определяется величина потока в пересчете на единицу площади дна (Мартынова, 2014).

Многие исследователи, проводившие сравнение этих трех методов, сходятся во мнении, что расчетный метод существенно занижает величину потока по сравнению с методом донных камер и методом трубок (Elrod et al., 2004).

В водохранилищах долинного типа глубина в приплотинном плесе и в верховьях существенно различается, поэтому и скорости трансформации органического вещества в водной толще также будут существенно разными, что, в свою очередь, сказывается на величинах обменных потоков на границе «вода — дно». При исследовании пространственной неоднородности обменных процессов между водой и грунтом необходимо проведение квазисинхронных комплексных гидролого-гидрологических съемок водохранилища. Таким образом, для наших целей при оценке величин потоков на границе «вода — дно» одновременно в разных районах водохранилища с различными типами грунтов наиболее продуктивным признан метод трубок (Sweerts et al., 1991). Высота колонки ДО в месте отбора для наших задач не имеет значения, поскольку основной обмен (трансформация лабильного ОВ) происходит в верхнем слое ила за время лабораторного эксперимента выбранным методом трубок длительностью около двух суток (Мартынова, 2014).

Определение HCO_3^- в трубках проводилось по стандартной гидрохимической методике (ГОСТ 31957-2012).

Содержание ОВ в грунте оценивалось по потерям веса при прокаливании, поскольку для поставленной задачи (сравнение содержания в донных отложениях разных частей одного водохранилища и оценки лабильности ОВ в ДО) это наиболее простой, удобный и экономичный метод. Гигроскопическая влажность ила определялась по разнице воздушно сухого и абсолютно сухого весов. В качестве параметров гидрологической структуры водной толщи использовались вертикальный градиент температуры воды (dT/dz) и толщина однородного гипоплимниона ($H_{\text{гипо}}$).

Сведения о погодных в районе проведения полевых исследований условиях получены для м/ст Можайска с сайта gr5.ru.

3. Результаты исследований

Синоптическая обстановка в районе исследований в периоды их проведения была разнообразна. Летний период 2017 г. характеризовался частой сменой погодных условий, штормами и невысокой температурой воздуха. В начале лета 2018 г. на водоеме наблюдалась теплая, как спокойная, так и ветреная погода, сменившаяся к июлю похолоданием. Прохладная погода осталась и в августе. Июнь 2019 г. характеризовался жаркой штилевой погодой, июль и август были достаточно холодными, ветренными и дождливыми. Такое разнообразие погодных условий привело к различиям в гидрологической структуре водохранилища во время проведения съемок (см. таблицу).

В таблице приведены объединенные по годам результаты наблюдений. Отдельно представлены результаты исследований для глубоководных (с глубиной более 8 м) и относительно мелководных (с глубинами менее 8 м) станций. На глубоководных станциях деструкция ОВ в столбе воды превышает величину валовой продукции фитопланктона в трофогенном слое, и ОВ не достигает дна. На относительно мелководных станциях, расположенных в верховьях водохранилища, в летний

Таблица. Характеристики гидрологической структуры, придонной воды и ДО на станциях русловой ложбины Можайского водохранилища в летний период 2017–2019 гг.

Год	2017	2018	2019
Уровень воды, м. абс.	182	182–181	180.5–179
SD, м	$\frac{0.6-1.4}{0.7-1.8}$	$\frac{1.05-1.34}{0.9-1.8}$	$\frac{0.35-0.8}{0.7-1.8}$
$(dT/dz)_{cp}$	$\frac{0.48-0.95}{0.34-0.71}$	$\frac{0.27-1.3}{0.66-1.04}$	$\frac{0.23-1.38}{0.42-1.24}$
$H_{гипо}$, м	$\frac{0.5-3}{2-8}$	$\frac{0.5-35}{0.5-7}$	$\frac{0.5-7}{3-10}$
O ₂ , мг/л	$\frac{0.8-2.3}{0.05-1.9}$	$\frac{0.16-0.6}{0.1-0.73}$	$\frac{0.34-2.45}{0.17-2.8}$
$D_{гипо}$, гС/м ³ сут	$\frac{0.01-0.29}{0.01-0.28}$	$\frac{0.11-0.24}{0.01-0.16}$	$\frac{0.20-0.30}{0.07-0.27}$
pH	$\frac{7.74-7.80}{7.51-7.63}$	$\frac{7.38-7.80}{7.30-7.59}$	$\frac{7.20-7.80}{7.21-7.42}$
ОВ, %	$\frac{6.8-12.0}{12.0-15.5}$	$\frac{4.6-11.4}{10.4-14.0}$	$\frac{10.8-11.8}{10.0-13.4}$
F(HCO ₃ ⁻), мгС/м ² сут	$\frac{115-375}{70-197}$	$\frac{83-165}{48-805}$	$\frac{204-643}{56-424}$

Примечание: Значения над чертой соответствуют станциям с глубинами менее 8 м, под чертой — более 8 м.

период чаще наблюдается разрушение слоя температурного скачка, меньшие глубины позволяют новообразованному в процессе фотосинтеза ОВ достигать дна: кроме того, возможно дополнительное поступление аллохтонного ОВ с речным притоком.

Величина pH придонной воды Можайского водохранилища в период исследований изменялась от 7.2 до 7.8, что согласно (Golterman, 1975) свидетельствует о содержании карбонатного углерода в поровой воде в виде HCO₃⁻.

Содержание O₂ в придонной воде не превышало 2.8 мг/л, а часто было менее 1 мг/л. Интенсивность деструкции ОВ в гипolimнионе ($D_{гипо}$) относительно мелководных станций в среднем за период исследований составила 0.180 мгС/м³сут, изменяясь от 0.01 до 0.30 гС/м³сут, а на глубоководных станциях — 0.09 мгС/м³сут, изменяясь от 0.01 до 0.24 мгС/м³сут. Вклад F(HCO₃⁻) в суммарное поступление С в гипolimнионе, связанное с разложением ОВ в толще воды и на границе «вода — донные отложения», составил в среднем на мелководных участках 25 %, а на глубоководных станциях — 50 %.

4. Обсуждение результатов

Из-за сложной и изменчивой вертикальной гидрологической структуры водохранилища, в котором в разные моменты наблюдались от одного слоя температурного скачка (в холодную ветренную погоду) до 2–3 слоев с высокими градиентами

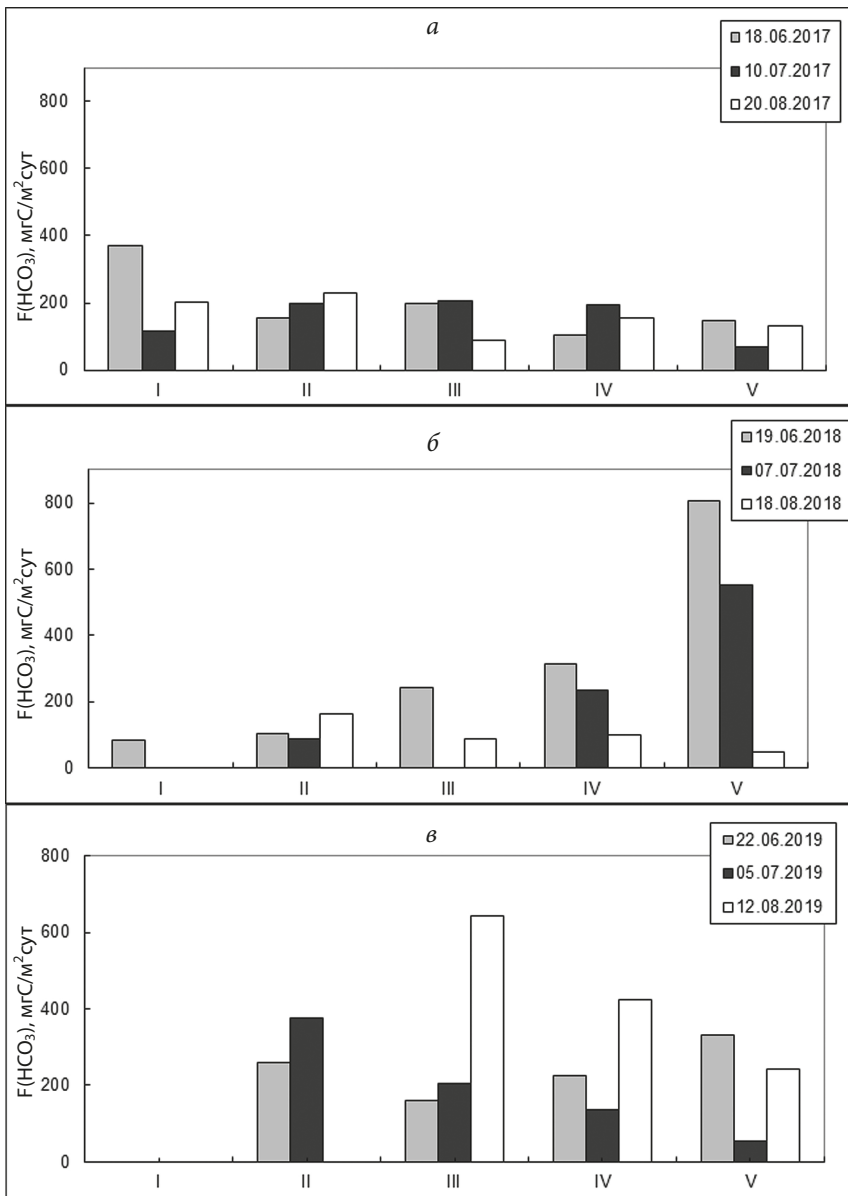


Рис. 3. Изменение величины потока гидрокарбонатного углерода из донных отложений Можайского водохранилища в 2017 (а), 2018 (б) и 2019 (в) гг.

температуры (в маловетренную антициклональную погоду), для дальнейшего анализа использовался осредненный по вертикали градиент температур — $(dT/dz)_{cp}$.

Как видно из таблицы, гидрологическая структура водохранилища в период исследований характеризовалась бóльшим разнообразием: средний вертикальный градиент температуры $(dT/dz)_{cp}$ в разных районах водохранилища изменялся от 0.23 до 1.38 °С/м, толщина однородного гипolimниона — от 0 до 10 м. Выход HCO_3^- из ДО русловой ложбины в среднем по водохранилищу за 3 года наблюде-

ний составил $220 \text{ мгС/м}^2\text{сут}$. Сопоставление с представленными в литературе величинами потоков HCO_3^- из ДО — $120\text{--}410 \text{ мгС/м}^2\text{сут}$ (Anderson et al., 1986; Мартынова и Козлова, 1987) — свидетельствует о совпадении порядка полученных на Можайском водохранилище величин потоков гидрокарбонатного углерода из ДО с другими исследованиями. Однако, как видно на рис. 3, даже на одной станции (V) диапазон колебаний $F(\text{HCO}_3^-)$ составлял от 50 до $800 \text{ мгС/м}^2\text{сут}$ (рис. 3), при том, что содержание ОВ в грунте на этой станции изменялось от 10 до 15.5%, а максимальное значение $F(\text{HCO}_3^-)$ наблюдалось при содержании ОВ 14%.

На рис. 4 представлено распределение послойного градиента температуры воды и потоков HCO_3^- из ДО по длине водохранилища. Для иллюстрации были выбраны характерные случаи, демонстрирующие различную гидрологическую структуру водохранилища. В съемку 19.06.2018 (рис. 4, а, в) нижняя граница термоклина в приплотинном районе (станция V) располагалась на глубине 12 м (т.е. на 8 м от дна), там же наиболее высока интенсивность потока HCO_3^- из ДО ($800 \text{ мгС/м}^2\text{сут}$). В верховьях слой с высокими градиентами температуры достигает дна, и интенсивность потока HCO_3^- невысока (менее $100 \text{ мгС/м}^2\text{сут}$). На рис. 4, б, г 05.07.2019 термоклин по всему водохранилищу кроме верховьев был заглублен до дна, и потоки HCO_3^- были невысоки (менее $200 \text{ мгС/м}^2\text{сут}$) и лишь в верховьях достигали $350 \text{ мгС/м}^2\text{сут}$. Таким образом, при наличии однородного гипolimниона отмечаются высокие величины выхода HCO_3^- из ДО, а при заглублении термоклина до дна интенсивность потока снижается.

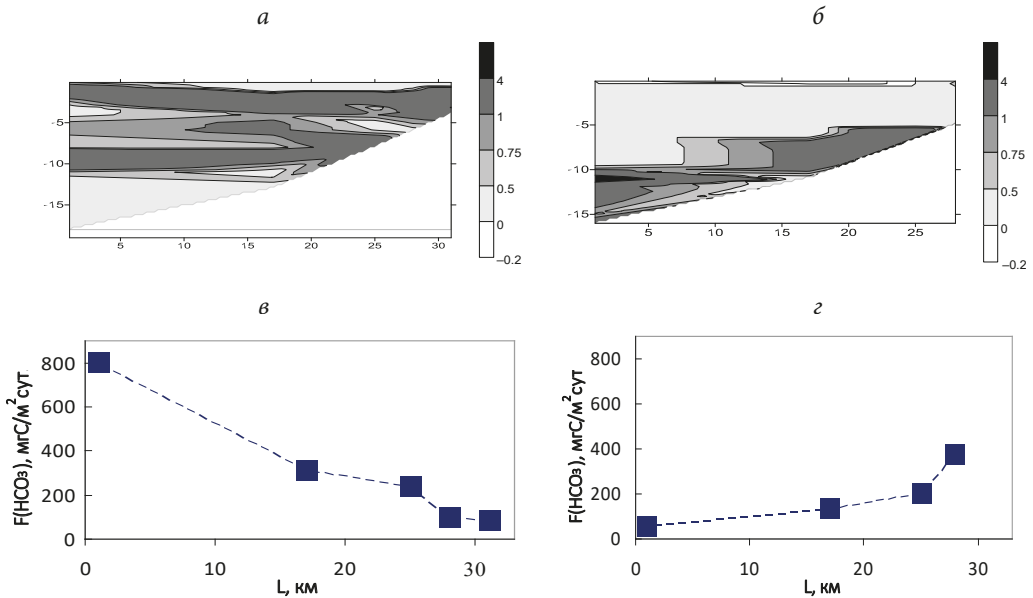


Рис. 4. Распределение послойного градиента температуры 19.06.2018 (а) и 05.07.2019 (б) и величины выхода HCO_3^- в илах русловой ложбины 19.06.2018 (в) и 07.07.2019 (г), L — расстояние от плотины

Анализ влияния характеристик верхнего двухсантиметрового слоя донных отложений на интенсивность общей деструкции ОВ в илах показал, что связь

$F(\text{HCO}_3^-)$ с ОВ в грунте и его гигроскопической влажностью отсутствует ($r = 0.2$ и $r = 0.3$ соответственно, при $n = 26$).

Возможно, более важное влияние оказывает свежевыпавшее на поверхность донных отложений ОВ.

Исследования седиментационных потоков ОВ в Можайском водохранилище (Кременецкая и др., 2013; 2018) показали, что в поступлении ОВ на дно русловой ложбины важную роль играет стратифицированность водной толщи и толщина однородного гипolimниона. Возникновение слоя температурного скачка изолирует гипolimнион. Анализ состава осадка седиментационных ловушек (Кременецкая и др., 2013) показал, что при увеличении устойчивости водной толщи к перемешиванию (при увеличении $(dT/dz)_{\text{cp}}$) в составе взвеси уменьшается доля минеральных частиц взмученных донных отложений и повышается доля автохтонной органики (в том числе и за счет развития сине-зеленых водорослей, обладающих плавучестью) и детрита, скорость оседания которых невелика. Седиментационный поток ОВ в водной толще состоит из вертикальной составляющей (осаждение взвеси, находящейся в воде) и квазигоризонтального придонного потока вещества, взмучиваемого сейшами и компенсационными течениями и направленного в русловую ложбину. При наличии однородного гипolimниона в придонной области величина квазигоризонтального седиментационного потока в русловую ложбину достигает больших величин, т. е. происходит «смыв» взмучиваемых придонными течениями и сейшами частиц ДО с площади занимаемого гипolimнионом ложа водохранилища. При заглублинии термоклина практически до дна и увеличении толщины перемешанного эпиплимниона наблюдались минимальные величины квазигоризонтального седиментационного потока в русловую ложбину, так как высокая устойчивость пикноклина к перемешиванию препятствует развитию придонных компенсационных течений.

Анализ изменения интенсивности $F(\text{HCO}_3^-)$ в зависимости от произведения толщины однородного гипolimниона ($H_{\text{гипо}}$) и среднего вертикального градиента температур $(dT/dz)_{\text{cp}}$ показал, что для станций с глубиной более 8 м прослеживается зависимость $F(\text{HCO}_3^-)$ от этого параметра (рис. 5), т. е. поступление ОВ в донные отложения русловой ложбины в значительной мере связано с трансседиментацией, поскольку осаждающееся автохтонное ОВ в значительной мере перерабатывается в толще воды. Сопоставление с ранее полученными по той же схеме данными для Можайского (в 2009–2011 гг.), Истринского (2014 г.) и Озернинского (2015 г.) водохранилищ подтверждает эту зависимость (рис. 5).

На неглубоких (менее 8 м) русловых станциях, расположенных в верховьях водохранилища, связь $F(\text{HCO}_3^-)$ с параметром $H_{\text{гипо}} \cdot (dT/dz)_{\text{cp}}$ незначима (коэффициент корреляции составляет лишь 0.5), однако обнаруживается связь величины потока HCO_3^- из ДО с прозрачностью воды поверхностного слоя (SD) (рис. 6). Ранее для Можайского водохранилища была получена зависимость величины биомассы фитопланктона от SD (Комплексные..., 1979), снижение SD свидетельствует об увеличении биомассы фитопланктона, а небольшие глубины позволяют автохтонному ОВ достигать дна. Кроме того, из-за небольших глубин длительность периодов стратификации в верховьях обычно невелика. Таким образом, в верховьях долинного водохранилища с асимметричным продольным профилем важную роль в ин-

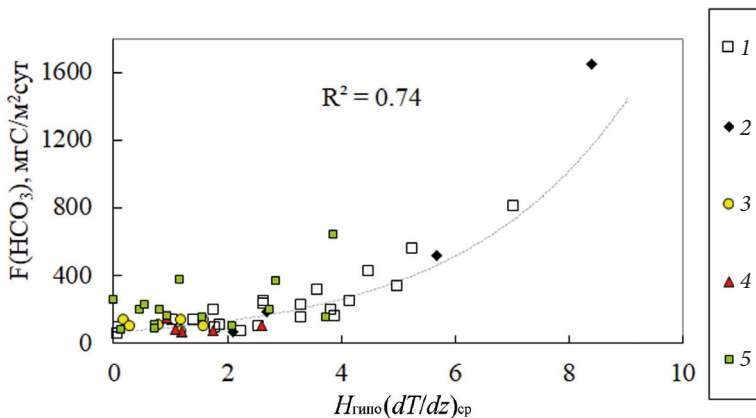


Рис. 5. Связь интенсивности $F(\text{HCO}_3)$ в илах русловой ложбины Можайского водохранилища с параметром $H_{\text{гипо}} \cdot (dT/dz)_{\text{ср}}$ на станциях с глубинами более 8 м в 2017–2019 гг. (1), в 2009–2011 гг. (2), Истринского (3) и Озернинского (4) водохранилищ и станциях Можайского водохранилища с глубинами менее 8 м (5)

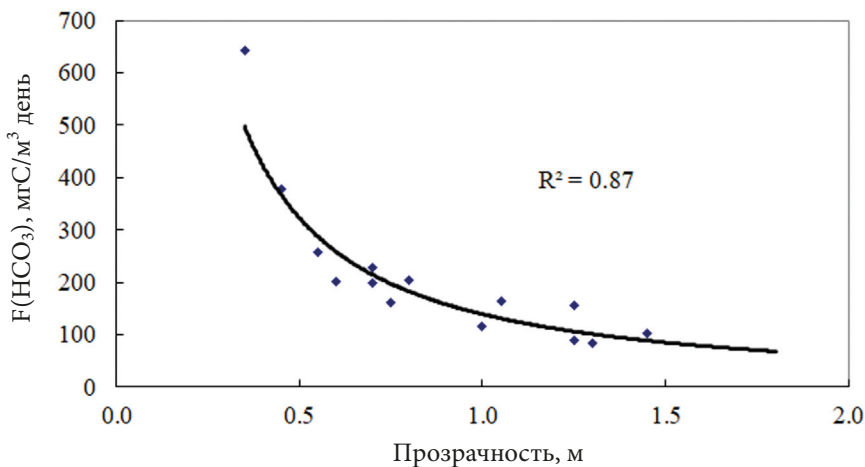


Рис. 6. Связь потока HCO_3 из ДО и прозрачности воды по диску Секки на русловых станциях Можайского водохранилища с глубинами менее 8 м

тенсификации процесса выхода гидрокарбонатного углерода играет автохтонное ОВ, связанное с развитием фитопланктона.

5. Заключение

Проведенные исследования показали, что в водохранилище долинного типа интенсивность потока HCO_3 из илов русловой ложбины в районах с глубинами более 8 м зависит от стратифицированности водной толщи и толщины однородного гипolimниона, т.е. изменение потока гидрокарбонатного углерода в значительной мере связано с трансседиментацией донных отложений пойменных участков и аккумуляцией их в русловой ложбине.

В районах с глубинами менее 8 м интенсивность выхода гидрокарбонатного углерода, в первую очередь, зависит от наличия автохтонного ОВ, связанного с развитием и отмиранием фитопланктона.

Таким образом, глубина станции определяет, какой из факторов влияния будет играть определяющую роль в формировании интенсивности потока HCO_3 из донных отложений.

Полученные зависимости можно использовать для прогноза потока гидрокарбонатного углерода из донных отложений.

Литература

- Винберг, Г. Г. (1960). *Первичная продукция водоемов*. Минск: Изд-во АН БССР.
- Дзюбан, А. Н. (2010). *Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов*. Ярославль: Принтхаус.
- Комплексные исследования водохранилищ. Т. 3.* (1979). Москва: Изд-во Московского университета.
- Кременецкая, Е. Р., Бреховских, В. Ф., Вишневская, Г. Н., Ломова, Д. В., Перекальский, В. М., Соколов, Д. И. (2013). Влияние стратификации на седиментационные потоки в долинном водохранилище. *Вестник РФФИ*, 2 (78), 51–56.
- Кременецкая, Е. Р., Ломова, Д. В., Соколов, Д. И., Ломов, В. А. (2018). Количественная оценка потоков органического вещества в донные отложения стратифицированного водохранилища долинного типа. *Вода: химия и экология*, 7 (9), 39–46.
- Ломова, Д. В., Гречушников, М. Г., Вишневская, Г. Н., Кременецкая, Е. Р., Ефимова, Л. Е., Соколов, Д. И. (2016). Внутриводоемные процессы в водохранилищах различного возраста. *Метеорология и гидрология*, 12, 63–74.
- Мартынова, М. В. (2010). *Донные отложения как составляющая лимнических экосистем*. Москва: Наука.
- Мартынова, М. В. (2014). *Железо и марганец в пресноводных отложениях*. Москва: Институт водных проблем РАН.
- Мартынова, М. В., Козлова, Е. И. (1987). Фосфор в отложениях двух высокоэвтрофных озер. *Водные ресурсы*, (2), 103–112.
- Мартынова, М. В., Шмидеберг, Н. А. (1973). О химическом составе илов Можайского водохранилища. В: *Комплексные исследования водохранилищ. Т. 2.* Москва: Изд-во Московского университета, 125–133.
- Anderson, L. G., Hall, P. O. J. and Iverfeldt, A. (1986). Benthic respiration measured by total carbonate production. *Limnology and Oceanography*, 31 (2), 319–329.
- Elrod, V., Berelson, W., Coale, K. and Johnson, K. (2004). The flux of iron from continental shelf sediments: a missing source of global budgets. *Geophysical Research Letters*, 31, 7–37. <https://doi.org/10.1029/2004GL020216>
- Golterman, H. L. (1975). *Physiological limnology. Vol. 2. An approach to the physiology of lake ecosystems*. Amsterdam: Elsevier Science.
- Sweerts, J., Bar-Gilissen, M., Cornelse, A. and Cappenberg, T. (1991). Oxygen-consuming processes at the profundal and littoral sediment-water interface of a small meso-eutrophic lake. *Limnology and Oceanography*, 36 (6), 1124–1133.

Статья поступила в редакцию 4 марта 2020 г.
Статья рекомендована к печати 14 декабря 2020 г.

Контактная информация:

Ломова Диана Владиславовна — florainter@mail.ru
Кременецкая Екатерина Рифовна — ekrem72@yandex.ru
Гречушников Мария Георгиевна — allavis@mail.ru
Ефимова Людмила Евгеньевна — ef_river@mail.ru
Ломов Виктор Александрович — Lomson@mail.ru

On the relation of bottom valley-type reservoir hydrocarbon carbon flux and hydrological structure of water body*

D. V. Lomova¹, E. R. Kremenetskaya¹, M. G. Grechushnikova^{1,2}, L. E. Efimova², V. A. Lomov²

¹ Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences,
3, ul. Gubkina, Moscow, 119333, Russian Federation

² Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

For citation: Lomova, D. V., Kremenetskaya, E. R., Grechushnikova, M. G., Efimova, L. E., Lomov, V. A. (2021). On the relation of bottom valley-type reservoir hydrocarbon carbon flux and hydrological structure of water body. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 66 (1), 61–73. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.104> (In Russian)

Circulation of carbon in water bodies is a fundamental process of the nutrient cycle in water ecosystems. Carbon flux from bottom sediments is currently the least studied chain of this circulation. The aim of this investigation was the study of HCO₃ flux from bottom sediments in the valley-type reservoir and identification of their relationship with the hydrological structure of the water column. Fieldwork and laboratory experiments were conducted at the Mozhaisk reservoir in 2017–2019. These years differed in weather conditions, level regime and stability of water masses. Hydrological surveys were conducted three times during the summer period of each year. They included measuring the vertical distribution of hydrological characteristics and sampling of water and bottom sediments. The Kuznetsov-Romanenko tube method was used to study exchange processes. Hydrocarbonate carbon flux from sediments into the water may range widely (50–900 mgC/m²day). By comparing HCO₃ flux with the hydrological structure of the water column, it was revealed that in deep (> 8 m) areas, the release of HCO₃ depends on the stratification and thickness of the uniform hypolimnion, where seiches and compensation currents may promote transsedimentation from shallow places to the flooded river bed. In areas with a depth of < 8 m, hydrocarbonate carbon flux from sediments depends much more on the autochthonic organic matter produced by phytoplankton. The relationship between HCO₃ flux and the content of organic matter in the soil and its hygroscopic humidity is insignificant.

Keywords: bottom sediments, hydrocarbonate carbon flux, stratification, reservoir.

References

- Anderson, L. G., Hall, P.O.J. and Iverfeldt, A. (1986). Benthic respiration measured by total carbonate production. *Limnology and Oceanography*, 31 (2), 319–329.
- Dzuban, A.N. (2010). *Destruction of organic matter and methane cycle in sediments of inner water bodies*. Yaroslavl: Printhouse Publ. (In Russian)
- Elrod, V., Berelson, W., Coale, K. and Johnson, K. (2004). The flux of iron from continental shelf sediments: a missing source of global budgets. *Geophysical Research Letters*, 31, 7–37. <https://doi.org/10.1029/2004GL020216>
- Golterman, H.L. (1975). *Physiological limnology. Vol. 2. An approach to the physiology of lake ecosystems*. Amsterdam: Elsevier Science.
- Kremenetskaya, E. R., Brekhovskikh, V. F., Vishnevskaja, G. N., Lomova, D. V., Perekal'skij, V. M. and Sokolov, D. I. (2013). Influence of stratification on sedimentation fluxes in bottom sediments of valley-type reservoir. *Vestnik RFFI*, 2 (78), 51–56. (In Russian)

* The present work was carried out under the theme AAAA-A16-116032810054-3 Hydrological regime of water objects under conditions of climate change and anthropogenic impact; fieldwork was supported by RFBR 18-05-01066.

- Kremenetskaya, E. R., Lomova, D. V., Sokolov, D. I. and Lomov, V. A. (2018). Numerical estimate of organic matter flux in bottom sediments of a stratified reservoir. *Voda, khimiia i ekologiya*, 7 (9), 39–46. (In Russian)
- Lomova, D. V., Grechushnikova, M. G., Vishnevskaya, G. N., Kremenetskaya, E. R., Efimova, L. E. and Sokolov, D. I. (2016). Intrawater processes in reservoirs of different age. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 12, 63–74. (In Russian)
- Martynova, M. V. (2010). *Bottom sediments as a component of limnological systems*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Martynova, M. V. (2014). Fe and Mn in freshwater sediments. Moscow: Water Problems Institute of the RAS Publ. (In Russian)
- Martynova, M. V. and Kozlova, E. I. (1987). Phosphorus in the sediments of two highly eutrophic lakes. *Vodnye resursy*, (2), 103–112. (In Russian)
- Martynova, M. V. and Schmideberg, N. A. (1973). About the chemical composition of the mud of the Mozhaisk reservoir. In: *Complex research of reservoirs Vol. 2*. Moscow: Moscow Univ. Press, 125–133. (In Russian)
- Sweerts, J., Bar-Gilissen, M., Cornelse, A. and Cappenberg, T. (1991). Oxygen-consuming processes at the profundal and littoral sediment-water interface of a small meso-eutrophic lake. *Limnology and Oceanography*, 36 (6), 1124–1133.
- Vinberg, G. G. (1960). *Primary production of lakes*. Minsk: Izdatel'stvo AN BSSR Publ. (In Russian)

Received: March 4, 2020

Accepted: December 14, 2020

Contact information:

Diana V. Lomova — florainter@mail.ru
 Ekaterina R. Kremenetskaya — ekrem72@yandex.ru
 Maria G. Grechushnikova — allavis@mail.ru
 Ludmila E. Efimova — ef_river@mail.ru
 Viktor A. Lomov — Lomson@mail.ru