

Внутриводоемные процессы в долинных водохранилищах разного возраста

Д. В. Ломова*, М. Г. Гречушникова*, **,
Г. Н. Вишневская*, Е. Р. Кременецкая*,
Л. Е. Ефимова**, Д. И. Соколов**

Рассмотрены водохранилища долинного типа разного возраста. Показано, что с течением времени происходит увеличение продуктивности водоема и вторичной фосфорной нагрузки, уменьшается численность роящегося макрозообентоса. При этом интенсивность процессов аэробного и общего разложения органического вещества на границе вода — донные отложения зависит не от возраста водохранилища, а от его стратифицированности, следовательно, определяется синоптической ситуацией.

Ключевые слова: водохранилище, органическое вещество, донные отложения.

Введение

Эвтрофирование водоема связано с такими внутриводоемными процессами, как увеличение концентрации биогенных элементов, вспышки цветения фитопланктона, увеличение деструкционных процессов, ухудшение кислородного режима, уменьшение самоочищающей способности вод. На границе раздела вода — донные отложения постоянно происходит обмен взвешенными и растворенными веществами, а сами донные отложения не просто пассивные аккумуляторы вещества — в них непрерывно происходят химические и микробиологические процессы.

Большинство водохранилищ России — долинного типа и относятся к мезотрофным водоемам димиктического типа. Функционирование их экосистем определяется, с одной стороны, комплексом гидрологических процессов, с другой — характером и интенсивностью биологических процессов. В течение существования водоема постепенно увеличивается уровень его трофии [6], в донных отложениях накапливается органическое вещество, поэтому интересно сравнить интенсивность процессов, протекающих на границе вода — дно в водохранилищах разного возраста.

В качестве объектов исследования были выбраны водохранилища долинного типа — Истринское (1935 г.), Ивановское (1937 г.) и Можайское (1960 г.). Эти водохранилища находятся в одних климатических условиях. Они относятся к морфологически сложным долинным водохранилищам,

* Институт водных проблем Российской академии наук; e-mail: flora_int@mail.ru.

** Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

Таблица 1

**Морфометрические характеристики Истринского [8],
Можайского и Ивановского водохранилищ (при НПГ)**

Водохранилище		C_v	Длина, км	Ширина, км		Площадь, км ²	Объем, 10 ⁶ , м ³	Глубина, м	
				наиболь- шая	средняя			наиболь- шая	средняя
Истринское	0,28	1,26—1,7	22	2	1,5	34	180	23	5,4
Можайское	0,14	0,8	28	2,6	1,1	31	235	22,6	7,7
Иваньковское		10,3		8		327	1120	20	3,4
Иваньковский плес	0,58		27	8	5,9	143	470	20	3,3
<i>Примечание.</i> — отношение средней глубины к средней ширине.									

осуществляющим многолетнее регулирование стока. Это относительно глубоководные (табл. 1) димиктические водоемы, в течение летнего периода в них наблюдается устойчивая температурная стратификация водной толщи. Относительная глубоководность и слабый водообмен Истринского и Можайского водохранилищ определяют большую величину осадконакопления [20]. За последние два десятилетия отмечается увеличение водообмена всех московских водохранилищ. Относительная глубоководность (отношение средней глубины к средней ширине) Ивановского водохранилища — наименьшая из рассматриваемых водохранилищ. Его средняя глубина составляет менее 3,5 м, поэтому большая часть донных отложений водохранилища находится в зоне, подверженной влиянию ветро-волнового взмучивания, что способствует активному переотложению поступающего на дно органического вещества в более глубокую зону. Кроме того, на протяжении летнего периода возможно перемешивание водной толщи практически до дна, поэтому длительной аноксии гипolimниона здесь не наблюдается.

Методика исследований

Исследования на Истринском водохранилище были проведены в июне 2014 г., на Ивановском — летом 1997 г., на Можайском исследования проводили в летние периоды 2010—2014 гг. Работы выполняли на станциях, наиболее полно дающих представление о характере грунта в разных районах водохранилищ.

Комплекс работ, проводимых на станции, включал измерения прозрачности воды (диск Секки), температуры и электропроводности воды (термокондуктометры YSI, WTW), содержания в ней кислорода (оксиметры YSI ProODO, WTW), отбор проб для определения растворенного в воде кислорода методом Винклера, мутности воды и деструкции органического вещества в воде (батометр Рутнера), отбор грунта (дночерпатели Экмана — Берджа, ДА-3) для постановки экспериментов по измерению потребления кислорода на границе раздела вода — донные отложения, общей деструкции органического вещества в илах и выхода общего фосфора из донных отложений. Кроме того, отбирался грунт для определения содер-

жания в нем органического вещества и его гигроскопической влажности, а также пробы для дальнейшего определения содержания в донных отложениях макрозообентоса. На Можайском и Ивановском водохранилищах определялась первичная продукция фитопланктона (постановка продукционно-деструкционных станций).

Содержание растворенного в воде кислорода определяли стандартным методом Винклера, минерального фосфора — фотометрическим модифицированным методом Мерфи и Райли с применением аскорбиновой кислоты [15], содержание общего фосфора — по методу Гейса, при котором используется сухой реактив персульфата калия и проба с реактивом кипятится 40 мин [15]. Деструкцию органического вещества в воде определяли скляночным методом Винберга [4], мутность воды — с использованием турбидиметра, гигроскопическую влажность оценивали по разности воздушно-сухого и абсолютно сухого весов, содержание органики — по потерям веса при прокаливании [1].

Скорость потребления кислорода донными отложениями, общую деструкцию органического вещества в илах и выход фосфора из донных отложений оценивали методом трубок в статических условиях, неоднократно апробированным на Можайском водохранилище [12, 17].

Общую деструкцию органического вещества в илах, состоящую из аэробной и анаэробной деструкции, оценивали по количеству HCO_3^- , выделяемого колонкой грунта за время экспозиции. Определение в воде HCO_3^- проводили стандартным ацидиметрическим методом. Аэробную деструкцию рассчитывали исходя из величины потребления кислорода грунтом, а анаэробную — как разность общей и аэробной. По полученным данным были рассчитаны отношения аэробной и анаэробной деструкции органического вещества в илах.

Потоки O_2 , HCO_3^- и P через 1 м^2 площади дна за сутки определяли по следующей формуле:

$$R = 240(C_{\text{тр}} - C_{\text{хол}})l/t,$$

где R — поток изучаемого элемента на границе раздела вода — донные отложения, $\text{мг}/(\text{м}^2 \text{ сут})$; $C_{\text{тр}}$ и $C_{\text{хол}}$ — содержание изучаемого элемента в трубке с илом и холостой трубке, $\text{мг}/\text{л}$; l — высота столба воды над илом, см ; t — время экспозиции, ч.

При анализе использовали значения потоков, полученные в лабораторных условиях (при $T = 20 \text{ C}$).

Сбор бентоса для исследования состава и количественных показателей проводили на русловых и пойменных станциях. Пробы отбирали дночерпателем Экмана — Берджа с площадью захвата $1/100 \text{ м}^2$ (по две выемки грунта на каждой станции). Затем пробы промывали через капроновое сито № 32 и обрабатывали по стандартной гидробиологической методике. Сырой вес гидробионтов определяли на торсионных весах.

Результаты и их обсуждение

Донные отложения Можайского водохранилища по классификации В. П. Курдина могут быть отнесены к вторичным неорганическим грунтам

[11]. Они представлены песчанистым серым и серым илом (занимающим соответственно 53 и 14% дна водохранилища), илистым песком (16%) и песком (5%) [5]. Содержание органического вещества в них сравнительно невелико и составляет 6—16% для илов, 4—8% для илистых песков и меньше 4% для песков [3]. Наиболее подробные съемки донных отложений Можайского водохранилища, охватывающие разные типы грунтов, были проведены летом 2010 г. (21—22 июня, 7—8, 26 июля, 21 августа).

Содержание органического вещества в илах русловой ложбины в верховьях увеличивалось в течение лета — от 6,7% в июне до 10,4% в августе. У плотины, наоборот, в течение лета содержание органического вещества снижалось с 13,6 до 10,1%; в средней части водохранилища его содержание колебалось от 12,4 до 14,7%, причем наибольшие значения отмечались в конце июня.

В воде и донных отложениях непрерывно протекают процессы разложения органического вещества, оно разрушается на 99% под воздействием живого населения (бактериопланктона и бактериобентоса). Потребление кислорода в придонной воде в русловой ложбине уменьшалось от верховьев к плотине от 49 до 13 мг $O_2/(м^2 \text{ сут})$, на пойменных участках — от 192 до 22 мг $O_2/(м^2 \text{ сут})$.

Интенсивность разложения органического вещества в илах определяется не валовым его содержанием, а количеством легкоусвояемых соединений [16]. Перемешивание водной толщи обеспечивает поступление на дно водоемов взвешенного вещества. Гигроскопическая влажность грунта d (%) характеризует свежесть исследуемого осадка: значения d в Можайском водохранилище колебались от 1,2 до 3,5% в конце июня (погода определялась прохождением циклона) до 3,3—5,9% (в первой половине июля).

Скорость потребления кислорода илами русловой ложбины 20 июня 2010 г. изменялась от 54 до 237 мг $O_2/(м^2 \text{ сут})$. Наибольшие за лето значения скорости потребления кислорода илами по всему водохранилищу отмечались 21 августа 2010 г. (от 181 до 324 мг $O_2/(м^2 \text{ сут})$), минимальные величины — в съемку 26 июля 2010 г., что, очевидно, связано с практически полным отсутствием O_2 в придонном слое воды; в течение всего летнего периода в среднем районе наблюдались наименьшие значения потока кислорода в донные отложения. Общая деструкция органического вещества в илах русла увеличилась от 0—191 мг $C/(м^2 \text{ сут})$ в начале июля до 139—519 мг $C/(м^2 \text{ сут})$ во второй половине лета.

Наименьшее содержание органического вещества в донных отложениях пойменных участков (2,5—3,6%) отмечалось в районе Красновидово — Блазново 20 июня 2010 г., а в целом его содержание изменялось от 5,8 до 10,6%, причем на станции Поздняково обычно наблюдались максимальные значения содержания органического вещества в донных отложениях за съемку. Гигроскопическая влажность грунта изменялась от 0,5 до 4,6%. Скорость потребления кислорода грунтами пойменных участков изменялась от 39 до 192 мг $O_2/(м^2 \text{ сут})$ и лишь в августе на станции Поздняково достигла 538 мг $O_2/(м^2 \text{ сут})$. Общая деструкция органического вещества в грунтах 20—21 июня 2010 г. уменьшалась от верховьев к плотине от

129—177 до $65 \text{ мг С}/(\text{м}^2 \text{ сут})$; в августе ее значения увеличились в верхнем и среднем районах до 317—354 $\text{мг С}/(\text{м}^2 \text{ сут})$, а у плотины остались около $60 \text{ мг С}/(\text{м}^2 \text{ сут})$.

В донных отложениях органическое вещество потребляется как аэробными, так и анаэробными микроорганизмами. Соотношение аэробной и анаэробной деструкции органического вещества в донных отложениях может служить своеобразным показателем продуктивности водохранилища, так как в олиготрофных водоемах, где в придонных слоях присутствует кислород, распад органического вещества идет за счет аэробных процессов, а в евтрофных, где кислорода мало, преобладает анаэробный процесс распада [17].

Соотношение аэробной и общей деструкции органического вещества в илах русловой ложбины изменялось в течение лета в разных районах водохранилища от практически нулевых значений при гипоксии гипolimнии до 87% при содержании O_2 более 2 мг/л . В среднем за лето происходило уменьшение доли аэробной деструкции в общей от 57% в верховьях (Горки) до 21—29% в среднем и нижнем районах. На пойменных участках вклад аэробной деструкции в общую изменялся от 8 до 64%.

Выход фосфора в илах русловой ложбины (при содержании $\text{O}_2 < 1 \text{ мг/л}$) летом 2011 г. уменьшался от 33 (станция Поздняково, где отмечалось и наибольшее содержание органического вещества в донных отложениях) до 7—9 $\text{мг Р}/(\text{м}^2 \text{ сут})$ в нижнем районе. Для песчанистых илов поток фосфора из донных отложений в воду изменялся от 8,6 до 15,6 $\text{мг Р}/(\text{м}^2 \text{ сут})$, для заиленных песков составил 2,2 $\text{мг Р}/(\text{м}^2 \text{ сут})$. В 2012 г. его выход в русловой ложбине изменялся от 1,3 до 25,6 $\text{мг Р}/(\text{м}^2 \text{ сут})$, а на пойменных участках он достигал 35 $\text{мг Р}/(\text{м}^2 \text{ сут})$.

В составе бентоса летом 2010 г. наблюдались олигохеты, хирономиды (хирономины, таниподины, мотыль и куколки), на пойменных станциях нижнего и среднего районов встречались двустворчатые и брюхоногие моллюски. Средняя за лето численность бентоса на русловых станциях изменялась от 340 до 850 экз./м^2 , на пойменных — от 130 до 405 экз./м^2 . Минимальная средняя за лето биомасса бентоса на русле ($1,7 \text{ г/м}^2$) отмечалась на станции Горки (в предыдущем году практически речная часть), в остальных частях водохранилища биомасса бентоса в русловой ложбине изменялась от 3,8 до 7,1 г/м^2 , на пойме — от 0,9 до 4,7 г/м^2 .

Исследования на Можайском водохранилище показали, что в случае песчанистого серого ила и илистого песка, залегающих на пойменных участках водохранилища, влияние бентоса на скорость потребления кислорода грунтами уменьшается с увеличением содержания в донных отложениях органического вещества [3]. Это связано с тем, что роющая деятельность макробентоса больше при малом содержании органики в грунте, так как животным недостаточно для питания находящегося на поверхности органического вещества. Однако для наиболее богатых органическим веществом илов русловой ложбины, где летом складываются наилучшие для бентоса температурные и кислородные условия, такой тенденции не наблюдается.

Донные отложения в Иваньковском водохранилище представлены первичными трансформированными грунтами (почвы обнаженные, разбух-

шие, заболоченные) и вторичными грунтами: песок (13% дна водохранилища), песок илистый (26%), ил песчанистый (46%), ил торфянистый и отложения из макрофитов (14%) [9]. Содержание органического вещества в песках составляет 1,4—2,8%, в песках илистых — 3,5—9,8%, в илах песчанистых серых — 10,2—20%, а в илах торфянистых и в отложениях из макрофитов — 42—62% [9].

По характеру залегания и закономерностям распределения донных отложений выделяются три разнотипных участка: Волжский, Ивановский и Шошинский плесы, которые различаются морфометрическими характеристиками, режимами скорости течения, волнения [9]. Илистые грунты занимают большие площади в Ивановском и Шошинском плесах. В Волжском плесе основная часть площади занята песчаными грунтами (особенно верхняя часть).

На Ивановском водохранилище отбор колонок грунта для постановки экспериментов по оценке скорости обменных процессов на границе вода — дно происходил в Ивановском плесе в районе впадения р. Созь и включал в себя станции, характеризующие разные типы грунтов: точка 1 — серо-коричневые илы, располагающиеся на глубине >6 м; точка 2 — илистый песок и песчанистые серые илы; точки 3 и 4 — устьевые участки впадающих в водохранилище рек Созь и Сорочка соответственно [7].

Потребление кислорода в придонной воде в Ивановском плесе изменялось от 55 до 110 мг $O_2/(м^2 \cdot сут)$ с максимумом над серо-коричневыми песчанистыми илами. Наибольшая скорость потребления кислорода донными отложениями отмечалась для серо-коричневых песчанистых илов (205 мг $O_2/(м^2 \cdot сут)$), уменьшаясь на устьевых участках до 48—88 мг $O_2/(м^2 \cdot сут)$. Общая деструкция органического вещества в серых и песчанистых илах составляла 726—916 мг $C/(м^2 \cdot сут)$. Соотношение аэробной и общей деструкции для песчанистого ила и заиленного песка составило 9,8—10,6%, на устьевых участках — около 1,5%. Таким образом, происходило в основном анаэробное разложение органического вещества. Выход фосфора из донных отложений в воду для песчанистых серых илов составил 32,2—36,5 мг $P/(м^2 \cdot сут)$, на устьевых участках рек Созь и Сорочка он достигал 54 мг $P/(м^2 \cdot сут)$.

Бентос распределен по Ивановскому водохранилищу неравномерно и заметно отличается по качественным и количественным показателям в каждом плесе. В целом он представлен олигохетно-хириноидным комплексом, другие группы организмов (моллюски, пиявки, мокрецы) присутствуют в незначительном количестве.

Наибольшей продуктивностью отличается Шошинский плес (средняя численность — 1120 экз./ $м^2$, средняя биомасса — 8,1 г/ $м^2$), донные отложения которого представлены илистыми грунтами с большим содержанием органического вещества. Несколько меньшие значения численности и биомассы бентоса (средняя численность по плесу 845 экз./ $м^2$, средняя биомасса — 4,1 г/ $м^2$) соответствуют более глубокому Ивановскому плесу, в котором также большая часть площади занята илистыми грунтами. Волжский плес характеризуется наименьшими показателями бентоса (средняя численность — 490 экз./ $м^2$, средняя биомасса — 2,1 г/ $м^2$).

В составе донных отложений Истринского водохранилища присутствуют пески, заиленный песок, песчанистый ил, серые илы. Поскольку в долинных водохранилищах разные типы грунта приурочены, как правило, к определенным типам рельефа, их распределение в Истринском водохранилище было оценено в результате анализа батиграфических кривых. Соотношение типов грунтов по водохранилищу составляет: песок — 16% дна, илистый песок — 35%, илы песчанистый и переходный серый — 24 и 25% соответственно.

Илы глубоких участков нижнего района Истринского водохранилища — это темно-серый, почти черный ил, очень рыхлый. Илы среднего района представлены илами оливкового цвета, также с очень рыхлой структурой. В верхнем районе (районе слияния рек Нудоль и Катыш) илы более светлые: серые и желто-серые более опесчаненной структуры. В колонках ила русловой части во всех трех районах встречаются черные слои, свидетельствующие о периодически возникающих аноксидных условиях в придонных слоях воды.

Илы пойменных участков нижнего и среднего районов Истринского водохранилища схожи по структуре с илами русловой части. Они представлены оливковыми или темно-серыми илами, однако в средней части иловые отложения более плотные. Поймы верхнего района представлены опесчаненными желто-коричневыми илами с более плотной структурой.

Содержание органического вещества в верхнем слое донных отложений максимальное в приплотинном районе (18%) и несколько уменьшается к верховьям (до 14%). При этом на пойменных станциях содержание органического вещества в грунте везде чуть меньше (12%).

На всех станциях Истринского водохранилища гигроскопическая влажность верхнего (0—2 см) слоя донных отложений d оказалась одинакова (4—4,6%) как на глубоких русловых станциях (где наблюдалась устойчивая стратификация), так и на пойменных в верхних районах (где стратификация отсутствовала и не было препятствий для осаждения детрита).

На русловых станциях приплотинного и среднего районов потребление кислорода донными отложениями отсутствует (малые значения содержания кислорода у дна из-за жаркой погоды, предшествовавшей съемке, в этом случае служат лимитирующим фактором), а в верхних районах водохранилища скорость потребления кислорода грунтами составляет около $200 \text{ мг O}_2/(\text{м}^2 \text{ сут})$. При этом в русловой части нижнего района потребление кислорода в придонной воде минимальное ($40 \text{ мг O}_2/(\text{м}^2 \text{ сут})$), а в других районах водохранилища примерно одинаково и колеблется от 100 до $140 \text{ мг O}_2/(\text{м}^2 \text{ сут})$. На пойменных станциях содержание кислорода в придонных горизонтах больше, чем на русловых, поэтому наибольшие значения скорости потребления кислорода грунтами наблюдаются в приплотинном и среднем районах ($200\text{—}250 \text{ мг O}_2/(\text{м}^2 \text{ сут})$), так как на этих станциях содержание органического вещества в грунтах больше, чем в верхних районах водохранилища. Потребление кислорода в придонных горизонтах воды на пойменных участках не превышает $40\text{—}60 \text{ мг O}_2/(\text{м}^2 \text{ сут})$.

Максимальные значения общей деструкции органики в грунтах отмечаются на русловых станциях нижнего и среднего районов, а также на глу-

бокой пойме нижнего района ($130 \text{ мг С}/(\text{м}^2 \text{ сут})$). На пойменных участках среднего района и в верхних частях водохранилища общая деструкция органического вещества в донных отложениях $D_{\text{общ}}$ колеблется от 70 до $100 \text{ мг С}/(\text{м}^2 \text{ сут})$.

Для русловых илов Истринского водохранилища доля аэробной деструкции органического вещества от общей в верхнем районе превышает 80%, в то время как в нижних районах деструкция органического вещества идет только за счет анаэробных процессов. Для илов пойменных участков вклад аэробных процессов составляет от 80 до 97%. Таким образом, на русловых станциях нижнего и среднего районов деструкция полностью протекает за счет анаэробных процессов, а в русле более верхних районов преобладают аэробные процессы разложения органического вещества. На пойменных станциях вклад аэробной деструкции составляет 60% (в верхних районах >80%).

Наибольший выход фосфора из донных отложений отмечался в русловой ложбине и на пойме нижнего района (серые илы) — $28\text{—}37,6 \text{ мг Р}/(\text{м}^2 \text{ сут})$. На пойменных отложениях верхнего и среднего районов (песчанистые илы желто-оливкового цвета) поток фосфора составлял $12,6\text{—}14,7 \text{ мг Р}/(\text{м}^2 \text{ сут})$.

Бентос Истринского водохранилища не отличается разнообразием. Были обнаружены три группы организмов: хаоборины, олигохеты, хирономиды. Общая биомасса бентоса изменялась от $0,2 \text{ г}/\text{м}^2$ в устьевой области притоков до $12 \text{ г}/\text{м}^2$ на пойме среднего района. Общая численность бентоса изменялась от 66 до $644 \text{ экз.}/\text{м}^2$. Ведущая роль по биомассе на русловых и пойменных станциях принадлежит хирономидам и хаоборинам. Численные показатели на пойменных станциях больше из-за присутствия крупных форм хирономид.

Сравнение скорости потребления кислорода разными типами грунтов Ивановского и Истринского водохранилищ со скоростью потребления кислорода схожих грунтов Можайского водохранилища (табл. 2), по которому имеется обширная база данных, показало, что эти значения близки при схожих условиях. Таким образом, можно применять зависимость скорости потребления кислорода грунтами от определяющих его факторов, полученные на Можайском водохранилище, для других подобных водохранилищ. Так, подробные многолетние исследования Можайского водохранилища показали, что факторы, оказывающие влияние на скорость потребления кислорода грунтами, меняются в зависимости от стратификации водоема. Наличие устойчивой температурной стратификации в водоеме в летний период влияет на величину потока органического вещества, попадающего на дно [2]. При неустойчивой стратификации водной толщи на дно опускается большое количество легкоусвояемого органического вещества из поверхностных слоев воды в виде отмершего детрита, что увеличивает интенсивность потребления кислорода донными отложениями. В этих условиях ведущая роль будет принадлежать таким факторам, как мутность придонного слоя воды и гигроскопическая влажность грунта. Усиление стратификации ведет к обособлению придонных слоев воды от поверхностных, что существенно снижает поступление на дно легкоусвояемого органического вещества. В этих условиях основными факторами, опреде-

Таблица 2

Характеристики придонной воды, грунта и скорости потребления кислорода донными отложениями в Ивановском (лето 1997 г.) и Истринском (лето 2014 г.) водохранилищах (числитель) в сравнении с донными отложениями Можайского водохранилища (знаменатель)

Характеристика	Водохранилище					
	Ивановское/Можайское		Истринское/Можайское			
Донные отложения	Ил песчанистый серо- коричневый	Илистый песок	Ил темно- серый	Ил оливковый	Ил оливковый со следами темно- серого	Ил желто- оливковый песча- нистый
Глубина, м	9/10,5	5/4,5	13/16,7	9/9	10,3/9,8	6,6/6,3
Температура, °С	17,8/12,6	18,8/19,3	11,5/10	16/14,4	13,9/13,7	15,8/16,6
Содержание кислорода, мг/л	1,9/1,5	5,3/0,7	4/0,7	7,6/0,7	1,1/1,9	7,8/0,6
Органическое вещество, %	4,22/6,75	2/4,4	15,5/16,9	11,5/9,5	13,8/8,3	11,8/10,7
Скорость потребления кислорода донными отложениями, мг O ₂ /(м ² сут)	205/194	174/176	423/434	364/335	338/356	211/214

ляющими скорость потребления кислорода грунтами, становятся наличие роющего макрозообентоса (в частности, олигохет) и содержание кислорода в придонных слоях воды.

По мере старения водоема происходит увеличение его трофии [6]. Основным источником автохтонного органического вещества в водоемах является первичная продукция фитопланктона. Первичная продукция фитопланктона в Можайском водохранилище за 40-летний период стала больше в 2,4 раза (табл. 3). В Ивановском водохранилище, которому на момент проведения исследований было около 60 лет, величина первичной продукции фитопланктона еще больше. Таким образом, можно констатировать, что по мере увеличения продолжительности существования водохранилища увеличивается его продуктивность.

Для сравнения интенсивности процессов обмена веществом на границе вода — донные отложения в рассматриваемых водохранилищах были выбраны илы русловой ложбины, так как они наименее подвержены ветровому взмучиванию и в них происходит накопление переотлагающегося из-за внутрисловых циркуляций материала. Содержание органического вещества в илах русловой ложбины со временем увеличивается (табл. 3). Накопление органического вещества в грунте приводит к увеличению интенсивности выхода фосфора из донных отложений в летний период. Надо отметить, что в последнее 20-летие в Можайском водохранилище участились случаи летней аноксии. Также можно отметить уменьшение численности роющего зообентоса (хинономид и олигохет) в русловой ложбине с увеличением возраста водохранилища.

Однако однонаправленного изменения скорости потребления кислорода донными отложениями и общей деструкции органического вещества в

Таблица 3

Сравнительные характеристики илов русловой ложбины и первичной продукции фитопланктона Можайского, Истринского и Ивановского водохранилищ

Характеристика	Водохранилище				
	Можайское		Ивановское		Истринское
	1970-е	1993—1997	2010—2014	1997	2014
Возраст на дату съемки, годы	10	40	55	60	79
Первичная продукция фитопланктона, мг С/(м ² сут)	1400 [18]	2200/(1390—3510)	3290/(2633—4005)	3870/(800—6940)	
Потребление кислорода придонной водой, мг О ₂ /(м ² сут)		190/(70—270)	78/(30—397)	70/(30—110)	126/(60—260)
Содержание органического вещества в грунтах, %	6,4 [5]	9,5/(7—12,2)	11,5/(5,8—14,7)	15,3/(10,2—20) [9]	16,7/(13,8—17,9)
Скорость потребления кислорода донными отложениями, мг О ₂ /(м ² сут)		380/(245—550)	168/(14—434)	200	334/(210—420)
Общая деструкция органического вещества в грунтах, мг С/(м ² сут)	150 [14]	1100/(500—1935)	287/(50—1647)	900	202/(98—306)
Выход фосфора из донных отложений, мг Р/(м ² сут)	0,5—1,6 [14]	13,5/(5,8—22,1)	18,1/(1,3—33)	34	31/(28—38)
Численность роющего зообентоса, экз./м ²	1960 [19]	850/(350—1850)	800/(100—2850)	700/(40—4000)	220/(60—600)

Примечание. В числителе указано среднее значение, в знаменателе — диапазон.

грунтах по мере старения водоема не наблюдается. Анализ всех имеющихся данных показал, что величина общей деструкции органического вещества (средневзвешенной по водохранилищу) в илах связана со стратифицированностью водоема (коэффициент корреляции между величиной общей деструкции органического вещества в донных отложениях и средним по вертикали градиентом температуры равен 0,67, число случаев $n = 12$). Возможно, это связано с тем, что при усилении стратификации в гипolimнии быстрее создаются аноксидные условия, приводящие к восстановлению и выходу из донных отложений разных соединений, кроме того, при усилении устойчивости водной массы к перемешиванию в составе взвеси, осаждающейся на дно русловой ложбины, уменьшается доля частиц взмученных донных отложений и увеличивается доля автохтонной органики [10].

Основными факторами, определяющими скорость потребления кислорода на границе раздела вода — дно, служат температура и содержание кислорода в придонных слоях воды, характеристики самих донных отложений (в частности, содержание в них органического вещества и нали-

чие роющего макрозообентоса), которые могут изменяться от года к году в зависимости от метеорологических условий, определяющих степень стратифицированности водоема.

С помощью данных о площади распространения разных типов грунтов по водохранилищам можно рассчитать количество потребленного донными отложениями кислорода и поступившего из донных отложений в воду углерода и фосфора. Так, в самом большом по площади Ивановском водохранилище илистые отложения без учета зоны песков в период исследований потребляли $46,8 \text{ т O}_2/\text{сут}$, в Истринском — $3,8 \text{ т O}_2/\text{сут}$, в Можайском — $4,1 \text{ т O}_2/\text{сут}$. Из донных отложений в водную толщу поступило углерода и общего фосфора: в Ивановском водохранилище $287 \text{ т C}/\text{сут}$ и $11,9 \text{ т P}/\text{сут}$, в Истринском — $5,2 \text{ т C}/\text{сут}$ и $0,6 \text{ т P}/\text{сут}$, в Можайском — $6,6 \text{ т C}/\text{сут}$ и $0,5 \text{ т P}/\text{сут}$ соответственно.

Однако при расчетах интенсивности процессов, протекающих на границе вода — дно, следует учитывать, что реальная температура придонной воды в водоеме, как правило, отличается от температуры, при которой проводили лабораторные эксперименты. Как показано в работе М. В. Мартыновой [13], величина потока фосфора из донных отложений в воду определяется преимущественно количеством фосфатов, высвобождающихся при деструкции органического вещества. Процесс разложения органического вещества в грунтах происходит при участии живых организмов (в частности, бактерий), интенсивность жизнедеятельности которых в значительной степени зависит от температуры их среды обитания. Введя поправку по нормальной кривой Крога в экспериментальные данные, можно получить интенсивность процессов обмена в реальном водоеме. В Ивановском водохранилище во время наблюдений температура придонной воды была около 20°C (что соответствовало температуре лабораторного эксперимента). В Истринском и Можайском водохранилищах разность температур придонной воды и во время эксперимента составила $8\text{—}10^\circ\text{C}$, поэтому интенсивность потребления кислорода грунтами и общая деструкция органического вещества непосредственно в водоеме будет в $1,8\text{—}2,3$ раза меньше, чем в лабораторных условиях.

Выводы

По мере старения водохранилища увеличиваются его продуктивность, запас органического вещества в донных отложениях и поток фосфора из грунтов в воду. В илах русловой ложбины уменьшается численность роющего макрозообентоса.

Возраст водохранилища не оказывает заметного влияния на интенсивность аэробной и анаэробной деструкции органического вещества в донных отложениях, поскольку эти процессы в большей степени связаны со стратифицированностью водной толщи, меняющейся в зависимости от синоптической ситуации.

Полевые работы в 2014 г. выполнены при поддержке РФФИ (проект 13-05-00137). Лабораторные анализы и обобщение данных многолетних наблюдений проведены при поддержке РНФ (проект 14-17-00155).

Литература

1. **Аринушкина Е. В.** Руководство по химическому анализу почв. — М., 1970, 487 с.
2. **Бреховских В. Ф., Вишневская Г. Н., Гашкина Н. А. и др.** О сезонной смене приоритетных факторов, определяющих интенсивность потребления кислорода грунтами водохранилища долинного типа. — Водные ресурсы, 2003, № 1, с. 61—66.
3. **Бреховских В. Ф., Вишневская Г. Н., Кременецкая Е. Р., Ломова Д. В.** Об оценке потребления кислорода разными типами грунтов долинных водохранилищ в летний период. — Метеорология и гидрология, 2006, № 10, с. 82—91.
4. **Винберг Г. Г.** Первичная продукция водоемов. — Минск, Изд-во АН БССР, 1960, 66 с.
5. **Виноградова Н. Н.** Взвешенные вещества и донные отложения. /В сб.: Комплексные исследования водохранилищ. — М., Изд-во МГУ, 1979, вып. 3, с. 231—261.
6. **Водохранилища** Москворецкой водной системы. /Под ред. В. Д. Быкова, Н. Ю. Соколовой, К. К. Эдельштейна. — М., Изд-во МГУ, 1985, 266 с.
7. **Гречушникова М. Г., Ломова Д. В., Вишневская Г. Н. и др.** Внутриводоемные процессы в долинных водохранилищах различного возраста. /В кн.: Материалы V Международной научно-практической конференции “Современные проблемы водохранилищ и их водосборов”. — Пермь, 2015.
8. **Ершова М. Г., Немальцев А. С., Пуклаков В. В., Сахарова М. И.** Гидроэкологическое состояние водохранилищ Подмосковья. /В сб.: Проблемы гидрологии и гидроэкологии. — М., Изд-во МГУ, 1999, вып. 1, с. 282—301.
9. **Иваньковское водохранилище: современное состояние и проблемы охраны.** /Отв. ред. М. Г. Хубларян. — М., Наука, 2000, 344 с.
10. **Кременецкая Е. Р., Бреховских В. Ф., Вишневская Г. Н. и др.** Влияние стратификации на седиментационные потоки в долинном водохранилище. — Вестник РФФИ, 2013, № 2(78), с. 51—56.
11. **Курдин В. П.** О классификации и происхождении грунтов водохранилища. — Бюллетень Института биологии внутренних вод, 1960, № 8, с. 9—11.
12. **Ломова Д. В.** Потребление кислорода донными отложениями водохранилища долинного типа. /Диссертация канд. геогр. наук. — М., МГУ, 1995.
13. **Мартынова М. В.** Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. — М., Наука, 2010, 244 с.
14. **Мартынова М. В., Шмидеберг Н. А.** О химическом составе илов Можайского водохранилища. /В сб.: Комплексные исследования водохранилищ. — М., Изд-во МГУ, 1980, вып. 5, с. 125—133.
15. **Методы гидрохимических исследований океана.** — М., Наука, 1978.
16. **Романенко В. И.** Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. — Л., Наука, 1985, 294 с.
17. **Романенко В. И., Кузнецов С. И.** Экология микроорганизмов пресных водоемов. — Л., Наука, 1974.
18. **Сахарова М. И.** Первичная продукция фотосинтеза фитопланктона. /В сб.: Комплексные исследования водохранилищ. — М., Изд-во МГУ, 1979, вып. 3, с. 270—274.
19. **Соколова Н. Ю.** Донная фауна и особенности ее формирования в водохранилищах водоснабжения г. Москвы (Можайском, Рузском, Озернинском, Учинском). /В сб.: Комплексные исследования водохранилищ. — М., Изд-во МГУ, 1971, вып. 1, с. 163—195.
20. **Эдельштейн К. К.** Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. — М., ГЕОС, 1998, 277 с.