

УДК 556.551+556.012(470.311)

М.Г. Гречушникова<sup>1</sup>, Д.В. Ломова<sup>2</sup>, Л.Е. Ефимова<sup>3</sup>, Г.Н. Вишневская<sup>4</sup>**ОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ГРАНИЦЕ ВОДА–ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ  
В ИСТРИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД<sup>5</sup>**

Приведены результаты комплексных полевых исследований обменных процессов на границе вода–донные отложения, впервые проведенных на Истринском водохранилище. Выявлена роль устойчивой стратификации в изменении величины потребления кислорода донными отложениями (SOD). Выполнена оценка SOD как в русловой ложбине, так и на пойме в разных районах водохранилища, а также поток минерального фосфора из донных отложений в воду. Комплекс работ выполнен для параметризации обменных процессов при настройке экологического блока модели ГМВ-МГУ на Истринском водохранилище.

*Ключевые слова:* донные отложения, потребление кислорода, деструкция, органическое вещество.

**Введение.** Кислород — один из наиболее важных элементов в водной экосистеме. Его содержание определяет течение многих химических реакций, условия для высших форм жизни, а также служит интегральным индикатором общего состояния экосистемы. Определение закономерностей режима растворенного в воде кислорода имеет большое значение для решения проблемы формирования и прогноза качества воды. Особенности режима растворенного в воде кислорода в стратифицированных водоемах обусловлены взаимодействием динамических и экологических факторов. Большинство водохранилищ России относится к мезотрофным димиктическим водоемам долинного типа. Функционирование их экосистем определяется, с одной стороны, комплексом гидрологических процессов, а с другой — характером и интенсивностью биологических процессов, поэтому необходимо изучать кислородный режим и факторы, его определяющие.

Донные отложения (ДО) играют важную роль в кислородном режиме водных объектов. На границе раздела вода–донные отложения постоянно происходит обмен взвешенными и растворенными веществами, а сами ДО не просто пассивные аккумуляторы вещества, в них непрерывно происходят химические и микробиологические процессы, в которых расходуется кислород. Скорость потребления кислорода (SOD) донными отложениями (ДО) зависит от типа грунта и его характеристик (таких, как содержание органического вещества (ОВ) и гигроскопическая влажность ( $d$ )), а также от других факторов (температура придонного слоя воды ( $T$ ), содержание в ней растворенного кислорода ( $O_2$ ), деструкция ОВ в придонном 10-сантиметровом слое

воды (ППВ), мутность ( $S$ ) и т.д.). В реальном водоеме все эти факторы действуют одновременно, часто противодействуя. Так, один показатель способствует увеличению скорости потребления кислорода дном в данный момент, а другой в то же время снижает ее [Бреховских и др., 2003], причем ДО довольно быстро реагируют на изменение внешних постоянно меняющихся в водоеме условий.

Особенно актуально оценить возможные изменения состояния экосистем водохранилищ в условиях изменений климата. Такая оценка возможна при помощи математических моделей, воспроизводящих комплекс процессов в водохранилищах. Одна из таких моделей — ГМВ-МГУ [Эдельштейн, 2014]. Эта модель неоднократно верифицировалась на наиболее изученном в московском комплексе — Можайском водохранилище. В качестве нового объекта исследований выбрано Истринское водохранилище, также один из источников водоснабжения Москвы, прогноз качества воды для которого весьма актуален. Истринское водохранилище, в отличие от Можайского, относится к морфологически сложным долинным водохранилищам. Оно, как и Можайское водохранилище, осуществляет многолетнее регулирование стока, однако имеет в 1,4 раза меньшую площадь водосбора, в 1,3 раза меньший объем, в 1,9 раза меньшую относительную глубину (отношение средней глубины к средней ширине) и в 1,4 раза меньший коэффициент водообмена. Такие отличия дают основания предполагать и другие особенности гидроэкологического режима водоема.

Один из важных процессов, определяющих вертикальное и пространственное распределение рас-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, вед. науч. с., канд. геогр. н.; Институт водных проблем РАН, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* allavis@mail.ru

<sup>2</sup> Институт водных проблем РАН, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* florainter@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* ef\_river@mail.ru

<sup>4</sup> Институт водных проблем РАН, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* florainter@mail.ru

<sup>5</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-05-00137, 12-05-00527), при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-17-00155).

творенного кислорода (и не только), — процесс потребления кислорода грунтами дна, параметризация которого крайне важна для математического моделирования (диагностических расчетов и прогнозов). На Можайском водохранилище неоднократно проводились комплексные полевые работы для изучения пространственных закономерностей этого процесса [Бреховских и др., 2006]. Необходимо исследовать обменные процессы в других водохранилищах московского водоисточника для правильной параметризации обменных процессов на границе вода–дно для настройки экологического блока модели ГМВ-МГУ.

**Материалы и методы исследований.** На Истринском водохранилище 29 июня 2014 г. работы выполнены на 7 станциях, которые наиболее полно дают представление о характере грунта в разных районах водохранилища с учетом его сложной конфигурации (рис. 1). Комплекс работ включал измерение прозрачности воды (диск Секки), температуры и электропроводности воды (термокондуктометр YSI), содержания в ней растворенного кислорода (O<sub>2</sub>, YSI ProODO), отбор проб для определения растворенного в воде кислорода, мутности воды и деструкции органического вещества (ОВ) в воде (батометр Рутнера), а также отбор грунтов (дночерпатель Экмана–Берджа) для постановки экспериментов по измерению потребления кислорода на границе раздела вода–донные отложения и общей деструкции ОВ в илах. Кроме того, отбирали грунт для определения содержания в нем ОВ, его гигроскопической влажности и содержания макрозообентоса в донных отложениях.

Определение содержания растворенного в воде кислорода проводилось стандартным методом Винклера, деструкцию ОВ определяли скляночным методом Винберга [Винберг, 1960], мутность воды — с использованием турбидиметра, гигроскопическая влажность оценивалась по разности воздушно-сухого и абсолютно сухого веса, содержание органических веществ — по потере веса при прокаливании [Аринушкина, 1970].

Скорость потребления кислорода донными отложениями (SOD) и общую деструкцию ОВ в илах оценивали методом трубок [Романенко, Кузнецов, 1974] в статических условиях, неоднократно апробированным на Можайском водохранилище [Ломова, 1995].

Общую деструкцию ОВ в илах определяли по количеству HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, выделяемого колонкой грунта за время экспозиции. Определение в воде HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> выполняли стандартным ацидиметрическим методом. Общая деструкция состоит из аэробной и анаэробной деструкции. Аэробная деструкция рассчитывается исходя из величины потребления кислорода грунтом, а анаэробная — как разница между общей и аэробной. Из полученных данных рассчитаны соотношения аэробной и анаэробной деструкции ОВ в илах. Содержание фосфора определяли согласно [Руководство..., 2003].

Сбор бентоса для исследования состава и количественных показателей проводили на русловых и пойменных станциях. Пробы отобраны дночерпателем Экмана–Берджа с площадью захвата 1/100 м<sup>2</sup> (по две выемки грунта на каждой станции). Затем пробы промывали через капроновое сито № 32 и обрабатывали по стандартной гидробиологической методике. Сырую массу гидробионтов определяли на торсионных весах.

Потоки вещества через 1 м<sup>2</sup> площади дна за сутки вычисляли по формуле [Романенко, Кузнецов, 1974]

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

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

**Результаты исследований и их обсуждение.** Относительная глубоководность и слабый водообмен Истринского водохранилища ( $K_{\text{в}}$  составлял 1,26 [Эдельштейн, 1998]) определяют большую величину осадконакопления. За последние два десятилетия отмечается увеличение водообмена во всех московских водохранилищах, в частности в Истринском до 1,7 год<sup>-1</sup>. Илы в русловой ложбине в верхнем районе водохранилища не столь существенно отли-

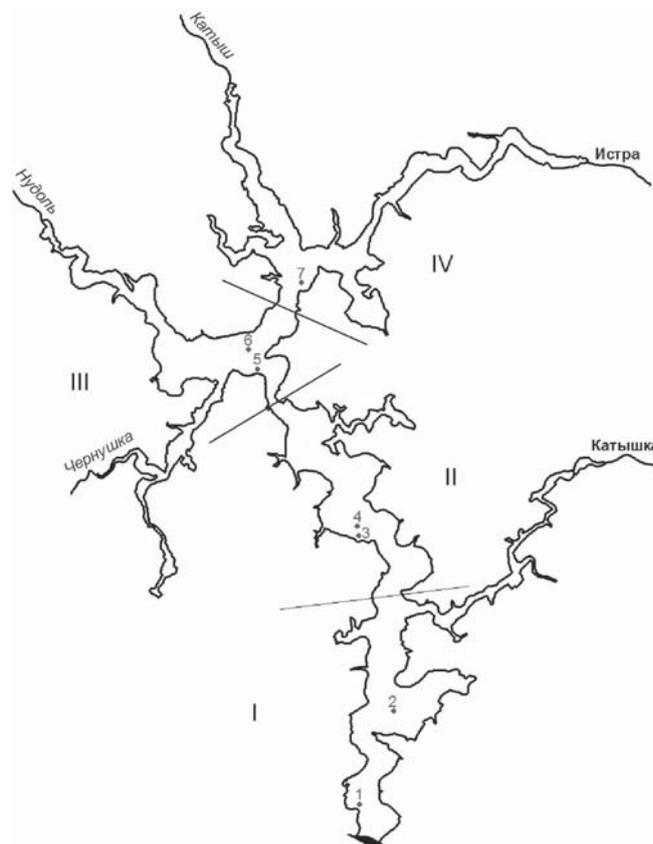


Рис. 1. Схема Истринского водохранилища (арабские цифры — номера станций отбора проб, римские цифры — номера отсечков)

чаются от илов на нижнем приплотинном участке, как, например, в Можайском водохранилище, поскольку Истринское водохранилище (1935) создано существенно раньше Можайского (1962). На условия осадконакопления влияют и особенности притоков. Основные притоки Можайского водохранилища — реки Москва и Лусьянка с площадью водосбора на постах недалеко от устья 755 и 170 км<sup>2</sup> соответственно. В Истринское водохранилище впадают реки Истра, Катыш и Нудоль с площадью водосбора 174, 70,5 и 291 км<sup>2</sup> соответственно. Это обуславливает принципиальную разницу в характере донных отложений в верховьях водохранилища.

Для наиболее репрезентативного охвата водоема выбрано 7 станций — 4 на русловой части и 3 на пойменных участках (станция I находится на нижнем приплотинном участке, II и III — в среднем районе, IV — в верхнем районе водохранилища). Илы на глубоких участках нижнего района Истринского водохранилища темно-серые, почти черные и очень рыхлые. Для среднего района характерны илы оливкового цвета, также с очень рыхлой структурой. В верхнем районе (у слияния рек Истра и Катыш) илы светлее — серые, желто-серые, имеют более опесчаненную структуру. В колонках ила во всех трех районах русловой части встречаются черные слои, что свидетельствует о периодически возникающих аноксидных условиях в придонных слоях воды.

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

исследований в водоеме наблюдалась устойчивая температурная стратификация. Слой температурного скачка был расположен на глубине 10–12 м в нижнем приплотинном участке водохранилища и на глубине 8–10 м в средней части водоема. На пойменных участках в средней части водохранилища и в верхнем районе температурная стратификация отсутствовала. Температура поверхностного слоя составляла ~17 °С, минимальная температура (9,9 °С) измерена на самой глубокой русловой станции у плотины.

Температура придонного слоя воды (рис. 2, А) на русловых станциях плавно увеличивалась от приплотинного района к верховьям водохранилища. На пойменных участках в среднем и верхнем районах температура в придонном слое составила 16 °С (при отсутствии стратификации), а в приплотинной части на пойме из-за большой глубины температура близка к температуре в русле (11,5 °С).

#### Рис 2

Установлено следующее распределение значений электропроводности по глубине (рис. 2, Б): во всех трех районах водохранилища она одинаково однородна до глубины ~8 м, затем по мере углубления увеличивается. При этом в нижнем и среднем районах примерно на уровне бровки русла наблюдается резкое увеличение значений электропроводности, что, вероятно, связано с выходом здесь грунтовых вод. Отметим и некоторое различие величин средней электропроводности эпилимниона во всех трех районах Истринского водохранилища — 300, 315 и 340 мк См/см от приплотинного к верхнему району соответственно. Характер распределения растворенного кислорода по вертикали во всех районах водохранилища на русловых станциях одинаков, имеет четко выраженный оксиклин на глубине от 8 до 12 м, что совпадает с вертикальным

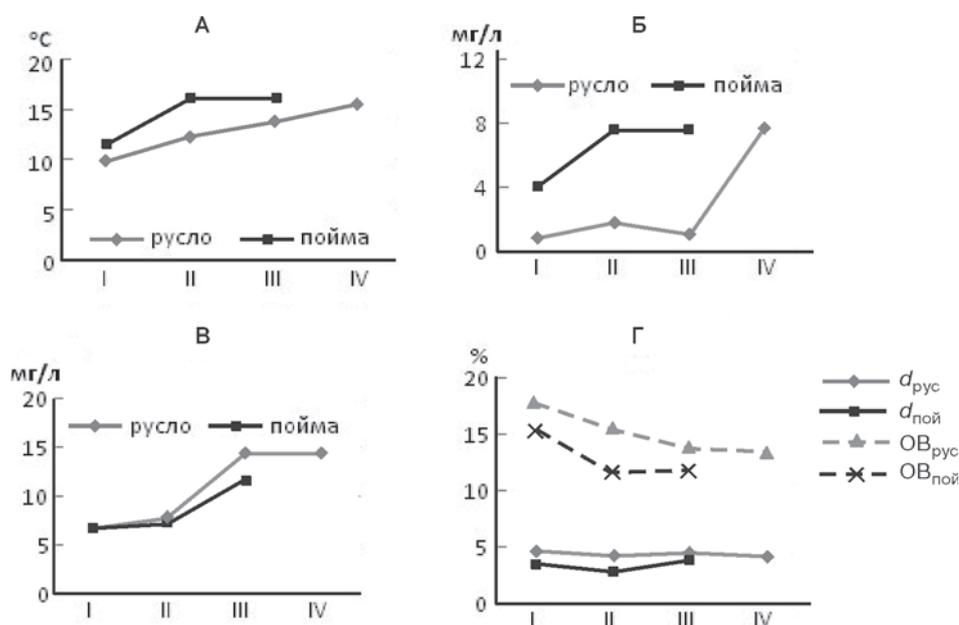


Рис. 2. Температура воды (А), содержание растворенного кислорода (Б) и мутность воды (В) в придонном слое разных районов Истринского водохранилища, а также влажность ( $d$ ) и содержание ОВ в верхнем слое ДО (Г) 29.06.2014

распределением температуры воды. На пойменных участках содержание кислорода по мере углубления меняется незначительно (за исключением поймы у плотины).

При этом содержание кислорода у дна (рис. 2, Б) на русловых станциях в трех нижних районах составило ~1 мг/л, на пойменных же участках только в приплотинном районе наблюдается снижение кислорода в придонном слое до 4 мг/л. На остальных станциях содержание кислорода по глубине практически не меняется.

Мутность придонного слоя воды (рис. 2, В) в приплотинном и среднем районах водохранилища одинакова на русловых и пойменных участках и варьирует от 7 до 8 мг/л. Мутность у дна в верхнем районе увеличивается и составляет здесь 12 мг/л на пойменной станции и 15 мг/л на русловых (что, возможно, связано с влиянием здесь стокового течения, проходящего по русловой ложбине, а также с переотложением илов с пойменных участков в связи с отсутствием температурной стратификации в районе поймы и возможным ветровым перемешиванием).

В воде и ДО непрерывно протекают процессы разложения ОВ, на 99% оно разрушается под воздействием бактериопланктона и бактериобентоса. Интенсивность разложения ОВ в илах определяется не его валовым содержанием, а количеством легкоусвояемых соединений [Романенко, 1985]. Перемешивание водной толщи обеспечивает поступление на дно водоемов взвешенного вещества. Гигроскопическая влажность грунта ( $d$ , %) характеризует “свежесть” исследуемого осадка. На всех станциях Истринского водохранилища  $d$  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). Таким образом, можно предположить, что в период, предшествующий съемке, массового цветения водорослей (а следовательно, и их отмирания) не было (рис. 2, Д). Содержание ОВ в верхнем слое донных осадков максимально в приплотинном районе (18%), несколько снижается к верховьям (до 14%). При этом на пойменных станциях содержание ОВ в грунте везде немного меньше (12%).

Основные факторы, определяющие характер и интенсивность процессов, протекающих на границе раздела вода–дно — температура и содержание кислорода в придонных слоях воды, а также характеристики самих донных отложений (в частности содержание в них ОВ и присутствие роющего макрозообентоса). Деструкция в придонных слоях воды также влияет на величину потребления кислорода в верхнем слое ДО. На рис. 3 показано потребление кислорода грунтом (SOD) и потребление кислорода в 10-сантиметровом слое придонной воды над 1 м<sup>2</sup> донных отложений (ППВ).

На русловых станциях в приплотинном и среднем районах SOD = 0 (малое содержание кислорода у дна объясняется жаркой погодой, предшествующей съемке, и служит в этом случае лимитирующим фактором), а в верхних районах водохранилища SOD ≈ 200 мг O<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/сут. При этом в придонной воде в русловой части нижнего района ППВ оно минимально (40 мг O<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/сут), а в других районах водохранилища примерно одинаково и колеблется от 100 до 140 мг O<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/сут. На пойменных станциях содержание кислорода в придонных горизонтах выше, чем на русловых, поэтому наибольшие величины SOD наблюдались в приплотинном и среднем районах (200–250 мг O<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/сут), так как на этих станциях содержание ОВ в грунтах больше, чем в верхних районах водохранилища. ППВ на пойменных участках не превышает 40–60 мг O<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/сут.

Важную роль в процессе потребления кислорода донными отложениями играет макрозообентос. Эти животные, в отличие от микробентоса, не просто расходуют кислород, но и принципиально меняют характер массопереноса в донных отложениях, создавая сеть нор и тем самым увеличивая площадь поверхности донных отложений. Исследования на Можайском водохранилище показали, что в случае песчанистого серого ила и илистого песка, залегающих на пойменных участках водохранилища, средний вклад бентоса в SOD уменьшается с увеличением количества ОВ [Бреховских и др., 2006]. Это связано с тем, что роющая деятельность макробентоса выше при малом содержании ОВ в грунте, так как этим организмам для питания недостаточно ОВ, находящегося на поверхности. Однако для наиболее богатых ОВ илов русловой

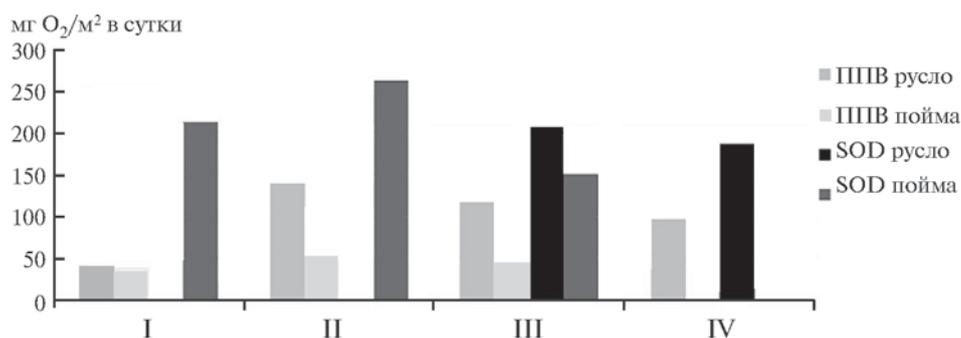


Рис. 3. Потребление O<sub>2</sub> придонной водой (ППВ) и грунтами дна (SOD) в разных районах Истринского водохранилища по данным съемки 29.06.2014

ложбины, где летом складываются наилучшие для бентоса температурные и кислородные условия, такая тенденция не наблюдается.

В районе исследований обнаружены 3 группы макрозообентосных организмов: хаоборины, хиромиды, олигохеты. Бентос не отличается разнообразием. Основу бентоса на всех станциях составляют *Chaoborus flavicans* (IV возраст) и *Chironomus* гр. *plumosus* (III и IV возраст). По биомассе ведущая роль на пойменных и на русловых станциях принадлежит хиромоидам и хаоборинам. Численные показатели биомассы на пойменных станциях выше за счет крупных форм хиромонид. Наибольшее количество организмов отмечено на пойменной и русловой станциях во втором районе.

В ДО органическое вещество потребляется как аэробными, так и анаэробными микроорганизмами. Соотношение аэробной и анаэробной деструкции ОВ в ДО может служить своеобразным показателем продуктивности водохранилища, так как в олиготрофных водоемах, где в придонных слоях присутствует кислород, распад ОВ происходит за счет аэробных процессов, а в евтрофных, где кислорода мало, преобладает анаэробный процесс распада органического вещества [Романенко, Кузнецов, 1974].

Как видно на рис. 4, А, максимальные величины общей деструкции ОВ в грунтах отмечены на русловых станциях в нижнем и среднем районах, а также на глубокой пойме нижнего района (130 мг С/м<sup>2</sup>/сут). На пойменных участках в среднем районе и верхних частях водохранилища общая деструкция колеблется от 70 до 100 мг С/м<sup>2</sup>/сут.

При этом если на русловых станциях в нижнем и среднем районах общая деструкция полностью идет за счет анаэробных процессов, то в русле верхних районов анаэробная деструкция составляет не более 20% от общей. На пойменных станциях вклад анаэробных процессов невелик и не превышает 40% (в верхних районах не более 20%).

Существование гипоксии в придонных слоях воды на русловых станциях в среднем и нижнем районах водохранилища обусловило довольно высокое содержание минерального фосфора ( $P_{\text{мин}} =$

$= 0,09 \pm 0,12$  мг/л), при этом его доля составила 70–95% от общего фосфора ( $P_{\text{вал}} = 0,1 \pm 0,15$  мг/л). Дефицит кислорода на поверхности илов способствовал регенерации фосфора из ДО, в результате чего возрастала концентрация его минеральной формы, а следовательно, и содержание  $P_{\text{вал}}$ . На более мелководных пойменных станциях и в верхней части водохранилища, где гипоксия не наблюдалась, концентрация валового фосфора у дна была в 1,5–2 раза меньше, чем на русловых станциях, а преобладающей формой фосфора на пойменных станциях стал органический фосфор. Его относительно высокое содержание ( $P_{\text{орг}} = 0,04 \pm 0,06$  мг/л) в придонной воде на пойменных станциях в средней и верхней частях водохранилища обусловлено, вероятно, накоплением оседающего детрита у дна.

В период проведения исследований из донных отложений поступал в воду в основном минеральный фосфор. Величина потока  $P_{\text{мин}}$  из дна в придонные слои в русловой части водохранилища близка во всех его районах (рис. 4, Б).

Выход минерального фосфора из ДО составил 19–25 мг Р/м<sup>2</sup>/сут, выход  $P_{\text{орг}}$  не превышал 14 мг Р/м<sup>2</sup>/сут. Поступление общего фосфора из илов на средней и верхней пойме было практически одинаковым (13–15 мг Р/м<sup>2</sup>/сут). При этом на пойме приплотинного района поток фосфора со дна сравним с потоком на русловой станции, поскольку илы пойменных участков в районе плотины на Истринском водохранилище похожи на илы в русловой ложбине. В целом в период исследований поток фосфора из ДО в воду на русловых участках и на глубокой пойменной части в приплотинном плесе был одинаков, что соответствует периоду умеренного цветения [Гашкина и др., 2004].

Как видно на рис. 5 и из данных таблицы, в грунтах верхних районов как Истринского, так и Можайского водохранилища процессы деструкции ОВ в донных отложениях идут с одинаковой интенсивностью (97–131 мг С/м<sup>2</sup>/сут). В среднем и нижнем районах  $D_{\text{общ}}$  в грунтах Можайского водохранилища в 1,7–2 раза выше, чем в Истринском, несмотря на то что содержание ОВ в донных

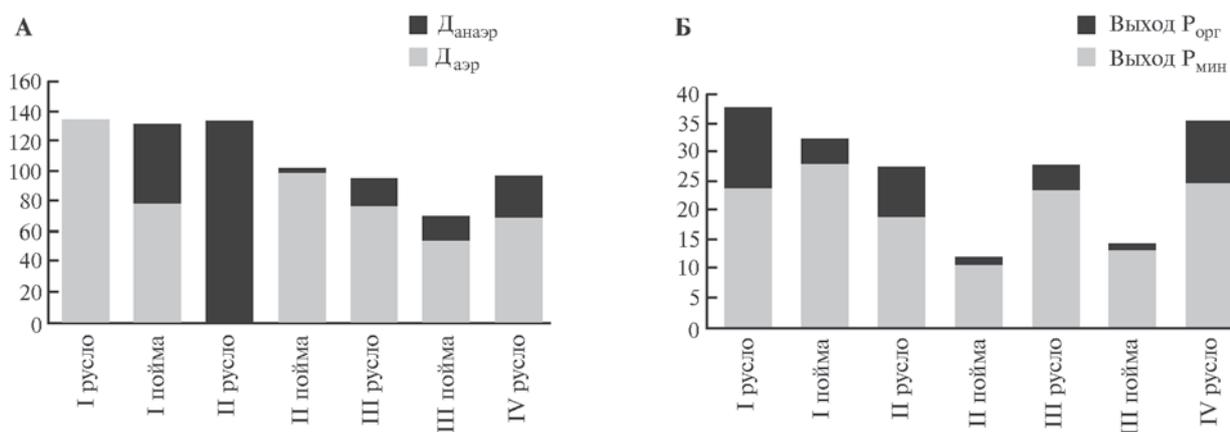


Рис. 4. Деструкция ОВ в грунтах (А, мг С/м<sup>2</sup>/сут) и величина потока фосфора из ДО в придонные слои воды (Б, мг Р/м<sup>2</sup>/сут)

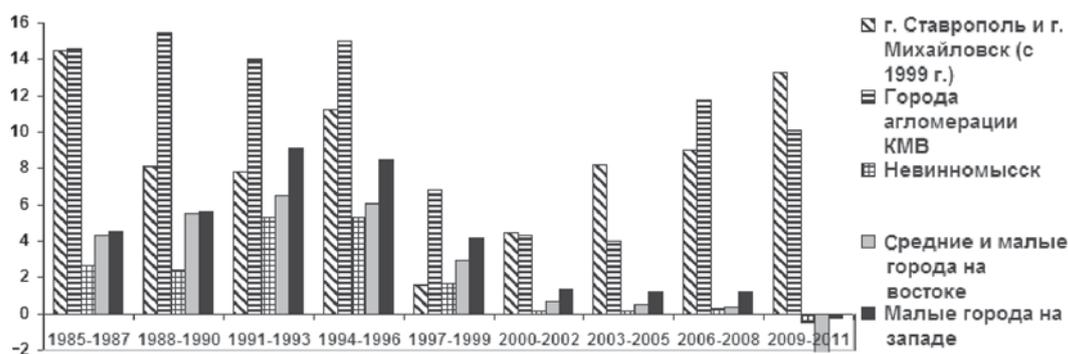


Рис. 5. Общая деструкция ОВ в грунтах (А) и потоки фосфора со дна (Б) в Истринском и Можайском водохранилищах (для Истринского водохранилища приведены данные, полученные 29.06.2014; для Можайского водохранилища — среднееголетние значения)

отложениях Истринского водохранилища больше (более чем в 1,5 раза). Поток минерального фосфора из ДО в воду в верхнем и среднем районах двух сравниваемых водохранилищ примерно сопоставим, а в приплотинном участке Можайского водохранилища существенно меньше (8 и 24 мг Р/м<sup>2</sup>/сут соответственно). Истринское водохранилище характеризуется меньшей пространственной неоднородностью исследуемых процессов.

Для Истринского водохранилища полученные результаты носят предварительный характер, поскольку получены по данным единственной съемки в условиях выраженной стратификации и неинтенсивного развития фитопланктона. Для выявления более общих закономерностей необходимы дополнительные наблюдения при иных гидрометеорологических условиях и желательно в период цветения.

**Выводы:**

- впервые проведены комплексные полевые исследования обменных процессов на границе вода–донные отложения на Истринском водохранилище;
- в приплотинном районе Истринского водохранилища грунты русловых и пойменных участков имеют схожие характеристики (как по влажности и содержанию ОВ, так и по интенсивности газообмена на границе вода–дно);
- устойчивая стратификация водной толщи приводит к уменьшению SOD, препятствуя обмену кислородом между эпилимнионом и гипolimнио-

ном и уменьшая поступление на дно легкоусвояемого ОВ;

- в условиях сложившейся гидрометеорологической ситуации в русловых илах Истринского водохранилища доля анаэробной деструкции ОВ от общей в нижних районах составляет 100%, а в верхнем не превышает 20%. Для илов на пойменных участках вклад анаэробных процессов составляет от 3 до 20%;

- поток минерального фосфора из ДО в воду составляет на русловых участках 22–24 мг Р/м<sup>2</sup>/сут, на пойменных участках он существенно меньше (11–14 мг Р/м<sup>2</sup>/сут);

- по материалам наблюдений 2014 г. в верхнем районе и выше по течению SOD в русле составляет 200 мг О<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/сут, в то время как на пойменных участках — 150 мг О<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/сут (75% от величины потребления кислорода грунтами русла). Пространственные различия в потреблении кислорода грунтами Истринского водохранилища по длине водоема выражены существенно меньше, чем в Можайском водохранилище, что обусловлено наличием трех небольших притоков, впадающих в разные районы водоема. Выявленные особенности необходимо учитывать при моделировании внутриводоемных процессов. Для более полной характеристики SOD нужно выполнить подобный комплекс наблюдений при отсутствии аноксидных условий.

Характеристики грунта, величина D<sub>общ</sub> в донных отложениях и потоки О<sub>2</sub> и Р на границе вода–дно в Истринском и Можайском водохранилищах

Водохранилище	Район	ОВ, %	d, %	SOD, мг О <sub>2</sub> /м <sup>2</sup> /сут	D <sub>общ</sub> , мг С/м <sup>2</sup> /сут	Выход Р <sub>мин</sub> , мг Р/м <sup>2</sup> /сут
Можайское	верхний	10,3	4	102	131	16
	средний	10,9	4	153	231	25
	нижний	9,4	3,7	237	286	8
Истринское	верхний	13,7	4,3	196	98	25
	средний	15,5	4,1	0	115	22
	нижний	17,9	4,6	0	135	24

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

*Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.

Arinushkina E.V. Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv [Manual to the chemical analysis of soils], MGU, Moscow, 1970, 487 p. (in Russian).

*Бреховских В.Ф., Вишневецкая Г.Н., Гашкина Н.А.* и др. О сезонной смене приоритетных факторов, определяющих интенсивность потребления кислорода грунтами водохранилища долинного типа // Водные ресурсы. 2003. Т. 30, № 1. С. 61–66.

Brehovskih V.F., Vishnevskaya G.N., Gashkina N.A. i dr. O sezonnoy smene prioritetnih faktorov, opredelyayuschih intensivnost' potrebleniya kisloroda gruntami vodokhranilishcha dolinnogo tipa [About seasonal change of the priority factors determining intensity of oxygen consumption by bottom soils of the valley type reservoir], Vodniye resursy, 2003, V. 30, no 1, pp. 61–66 (in Russian).

*Бреховских В.Ф., Вишневецкая 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.

Brehovskih V.F., Vishnevskaya G.N., Kremeneckaya E.R., Lomova D.V. Ob ocenke potrebleniya kisloroda raznymi tipami gruntov dolinnykh vodokhranilishch v letniy period [About estimation of oxygen consumption by different types of bottom soils in valley type reservoirs in a summer period], Meteorologiya i gidrologiya, 2006, no 10, pp. 82–91 (in Russian).

*Винберг Г.Г.* Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 66 с.

Vinberg G.G. Pervichnaya produkciya vodoemov [Primary production in water objects], Izd-vo AN BSSR, Minsk, 1960, 66 p. (in Russian).

*Гашкина Н.А., Пуклаков В.В., Кременецкая Е.Р.* Динамика фосфора и балансовая оценка его обменных процессов с дном в Можайском водохранилище в вегетационный период // Водные ресурсы. 2004. Т. 31, № 6. С. 702–712.

Gashkina N.A., Puklakov V.V., Kremeneckaya E.R. Dinamika fosfora i balansovaya ocenka ego obmennykh processov s dnom v Mogaiskom vodokhraniliche [Phosphorus dynamics and balance assessment of its exchange processes with bottom in Mogaisk reservoir in vegetation season], Vodniye resursy, 2004, V. 31, no 6, pp. 702–712 (in Russian).

*Ломова Д.В.* Потребление кислорода донными отложениями водохранилища долинного типа: Автореф. канд. дисс. М., 1995.

Lomova D.V. Potreblenie kisloroda donnymi otloshchennyami vodokhranilishcha dolinnogo tipa [Oxygen consumption by bottom sediments in a valley type reservoir], Avtoref. kand. diss., Moscow, 1995 (in Russian).

*Романенко В.И.* Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Л.: Наука, 1985. 294 с.

Romanenko V.I. Mikrobiologicheskiye processy produkcii i destrucci organicheskogo veshchestva vo vnutrennih vodoemah [Microbiological processes of production and destruction in internal reservoirs], Nauka, Leningrad, 1985, 294 p. (in Russian).

*Романенко В.И., Кузнецов С.И.* Экология микроорганизмов пресных водоемов. Л.: Наука, 1974. 189 с.

Romanenko V.I., Kuznecov S.I. Ekologiya mikroorganizmov presnykh vodoemov [Ecology of microorganisms in fresh water reservoirs], Nauka, Leningrad, 1974, 189 p. (in Russian).

Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.

Rukovodstvo po himicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybohozyaystvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla rayonov Mirovogo okeana [Manual for chemical analysis of salt and fresh waters in ecological monitoring of fishery objects or perspective for fishery ocean areas], Izd-vo VNIRO, Moscow, 2003, 202 p. (in Russian).

*Эдельштейн К.К.* Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.

Edelshteyn K.K. Vodokhranilishcha Rossii: ekologicheskiye problemy, puti ih resheniya [Reservoirs of Russia: ecological problems, solutions], GEOS, Moscow, 1998, 277 p. (in Russian).

*Эдельштейн К.К.* Новый подход к оценке репрезентативности данных мониторинга качества воды в водохранилищах — источниках водоснабжения // ВодаMagazine. 2014. № 7(83). С. 36–43.

Edelshteyn K.K. Noviy podhod k ocnke representativnosti dannykh monitoringa kachestva vody v vodokhranilishchah — istochnikah vodosnabzheniya [New approach to the assessment of monitoring data representativeness in reservoirs — sources of water supply], VodaMagazine, 2014, no 7(83), pp. 36–43 (in Russian).

Поступила в редакцию  
16.10.2014

M.G. Grechushkina, D.V. Lomova, L.E. Efimova, G.N. Vishnevskaya

#### EXCHANGE PROCESSES AT THE CONTACT OF WATER AND BOTTOM SEDIMENTS IN THE ISTRA RESERVOIR DURING THE SUMMER PERIOD

The article presents the results of complex field investigation of exchange processes at the contact of water and bottom sediments which were for the first time carried out for the Istra reservoir. The role of stable stratification in changing the values of sediment oxygen demand (SOD) is revealed. The SOD was evaluated both in the channel depression and on the floodplain in different parts of the reservoir. The mineral phosphorus flux from the bottom sediments into water was also estimated. The study was carried out in order to parameterize the exchange processes for tuning the ecological block of the GMV-MSU model on the Istra reservoir.

*Key words:* bottom sediments, oxygen demand, destruction, organic matter.