

Библиографический список

1. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 247 с.
2. Калинин В.Г., Калинин Н.В. Оценка однородности условий ледообразования на реках водосбора Воткинского водохранилища // Географический вестник. 2012. № 3 (22). С. 39–43.
3. Наставление по службе прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1962. Разд. III. Ч.1. 362 с.

V.G. Kalinin, N.V. Kalinin**ANALYSIS OF CORRELATION DEPENDENCES OF ICE FORMATION TERMS FROM MAIN FACTORS ON RIVERS OF THE BASIN OF VOTKINSKIY WATER STORAGE RESERVOIR**

The research of correlations dependences of ice formation on rivers of the basin of votkinskiy water storage reservoir from the date of transition of air temperature over 0°C to negative values at the nearest meteorological station to the hydrological post. It was revealed that the parameters *a* and *b* in the linear regression equation determined by varying degrees of influence azonal factors and their spatial distribution is not subject to the law of geographical zoning.

Key words: river; ice regime; the processes of ice formation; correlation dependences.

Vitaly G. Kalinin, Doctor of Geography, Professor of Department of Physical Geography and Landscape Ecology, Perm State University; 15 Bukireva, Perm, Russia 614990; vgakalinin@gmail.com

Nikita V. Kalinin, economist of Bank of Russia; 12 Neglinnaya, Moscow, Russia 103016; niki_kalinin@mail.ru

УДК 556.5 (551.3.051)

Е.Р. Кременецкая, В.В. Законнов, Д.В. Ломова, Д.И. Соколов**СТРУКТУРА ВНУТРИВОДОЕМНЫХ ПОТОКОВ ВЗВЕШЕННЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В МОЖАЙСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ**

На основании материалов гидрологических съемок Можайского водохранилища в 2009 г. получены количественные оценки изменчивости физико-химических показателей состава и концентрации взвешенных веществ и донных отложений. Проводились наблюдения за образованием органического вещества в результате продуцирования фитопланктона, его осаждением в ходе седиментационных процессов и содержанием органического вещества в воде и донных отложениях. Составлены ориентировочные седиментационные балансы четырех районов водохранилища, в которых впервые оценены величины взмучивания взвесей со дна.

Ключевые слова: взвеси; донные отложения; седиментация; трансседиментация; режим эксплуатации; водохранилища питьевого назначения; качество воды.

© Кременецкая Е.Р., Законнов В.В., Ломова Д.В., Соколов Д.И., 2013
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-05-00657-а)

Кременецкая Екатерина Рифовна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных проблем Российской академии наук; Россия 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; ekrem@front.ru

Законнов Виктор Васильевич, доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и гидрохимии Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук; Россия 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 59, кв. 42; zak@idiw.yaroslavl.ru

Ломова Диана Владиславовна, кандидат географических наук, научный сотрудник Института водных проблем Российской академии наук; Россия 119333 Москва, ул. Губкина, д. 3; florainter@mail.ru

Соколов Дмитрий Игоревич, научный сотрудник МГУ им. М.В.Ломоносова; Россия 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; fabulist@list.ru

Ухудшение экологического состояния континентальных водоемов как следствие естественных процессов и антропогенной деятельности на водосборе стало типичным явлением. Это может приводить к непригодности их использования в хозяйственных и рекреационных целях.

Важнейшими характеристиками экологического состояния водных объектов питьевого назначения являются взвешенные вещества (ВВ) и донные отложения (ДО). Количество и состав взвесей играют первостепенную роль в пресноводных экосистемах – взвешенные частицы уменьшают прозрачность воды, влияют на проникновение в нее света, на ее температуру, на интенсивность сорбционно-десорбционных процессов. От скорости седиментации взвесей зависит состав и распределение ДО. На границе раздела вода – донные отложения постоянно происходит обмен взвешенными и растворенными веществами, а сами ДО являются не только аккумуляторами веществ (в т. ч. и загрязняющих), но и катализаторами химических и микробиологических процессов. Взмучивание ДО и их трансседиментация может приводить к вторичному загрязнению водной толщи.

В водохранилищах, в отличие от озер, обычны значительные колебания уровня воды как внутри года, так и межгодовые, что сильно влияет на формирование и распределение взвесей, на скорость накопления донных отложений в районах, по-разному удаленных от гидроузла.

В Можайском водохранилище в 2008–2009 гг. уровень воды с мая по октябрь поддерживался на 4,5–6,0 м ниже НПУ, что интенсифицировало процессы горизонтального и вертикального перемещения взвешенных минеральных и органических веществ. Это способствовало повышению надежности оценки соотношения скорости этих потоков, определяющих режим мутности воды и скорость иллонакопления.

Цель работы – оценка соотношения интенсивности адвективных (перемещающихся вдоль по водохранилищу от верховьев) и трансседиментационных (внутрипесовый перенос от мелководий в русловую ложбину в придонной области и в толще воды) потоков, а также суммарной седиментации взвесей в разных частях долинного водохранилища в год средней водности при частично сработанном полезном объеме, когда эти три потока особенно активизируются.

Материалы и методы исследований

Изучение характеристик экосистемы Можайского водохранилища основывалось на данных квазисинхронных гидролого-гидрохимических и грунтовых съемок всего водохранилища (6 съемок) и Красновидовского плеса (19 съемок), расположенного в средней части (рис. 1). Исследования проводились в летний период 2009 г. (с начала июня до середины августа).

Выбор станций, включенных в съемку, обеспечивал освещение данными всех трех районов водохранилища: верхнего (ст. Поздняково и Троица, расположенных на расстоянии 31,7 и 25,5 км от гидроузла по длине русловой ложбины соответственно), среднего (ст. Красновидово, 17,5 км) и нижнего – ст. Горошковский остров и плотина (10,9 и 0,7 км от гидроузла соответственно).

Вследствие пониженного уровня воды в 2009 г. ст. Горки (37,9 км) характеризовала речную часть (зону выклинивания подпора) водохранилища. Комплекс работ, проводимых на станциях, включал измерения прозрачности воды SD, температуры, электропроводности, содержания кислорода (термокондуктометр и оксиметр WTW), отбор проб (батометр) для определения растворенного в воде кислорода, перманганатной (ПО) и бихроматной окисляемости (БО), цветности (ЦВ), мутности воды и количества в ней взвесей. Отбор проб на мутность воды производился с шагом 1 м по глубине, пробы на ПО, БО и цветность воды отбирались с поверхности воды, из придонного горизонта, над и под слоем температурного скачка. С помощью дночерпателя Экмана-Берджи отбирался грунт для определения содержания в нем органического вещества (ОВ), естественной влажности (ЕВ) и гранулометрического состава.

Определение содержания растворенного в воде кислорода проводилось стандартным методом Винклера, мутности воды – с использованием турбидиметра (2100P) в нефелометрических единицах мутности NTU (всего отобрано и обработано 1016 проб), количество взвесей – фильтрованием через ядерные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм (60 проб), ЦВ – по платиново-кобальтовой шкале, ПО – методом Кубеля в кислой среде [1], общее содержание ОВ – методом бихроматного окисления в модификации А.П.Остапени [13] (по 340 проб). ЕВ оценивалась (в %) по разности весов между натуральной пробой и абсолютно сухим образцом, содержание ОВ определялось по потере в весе при прокаливании [2] (всего было обработано 27 образцов грунта).

Гидрология

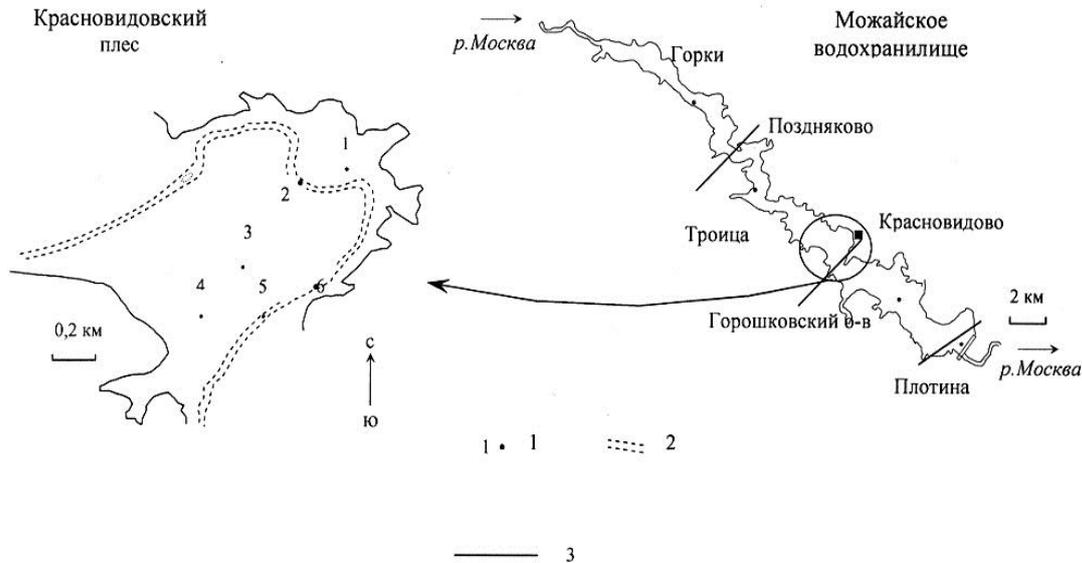


Рис. 1. Схема Можайского водохранилища и Красновидовского плеса (1 – место расположения станции наблюдения и ее номер; 2 – затопленное русло р. Москвы; 3 – створы грунтовых разрезов)

Для приведения величин мутности воды в NTU (по турбидиметру) в единицы $мг/л$ проводились параллельные ее измерения с помощью турбидиметра и количеством взвешенного вещества на фильтрах (с диаметром пор $0,45 \text{ мкм}$). Для всех точек (цветность воды в пробах была $50\text{--}95 \text{ град Pt-Co}$) получена следующая статистическая зависимость:

$$\text{Свзвеси (мг/л)} = 0,99 \cdot NTU - 0,01, \quad (1)$$

при корреляционном отношении $r^2 = 0,91$ и числе точек $n = 60$, где NTU – величина мутности (в нефелометрических единицах).

Для проверки формулы (1) построена зависимость преобразования значений мутности по величине NTU в единицы $мг/л$. В дистиллированную воду добавляли осадок (известного веса) и измеряли NTU . Полученная таким образом зависимость имела следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{Свзвеси (мг/л)} &= 1,08 \cdot NTU + 0,07, \\ r^2 &= 0,99 \text{ при } n = 7. \end{aligned} \quad (2)$$

Как видно, коэффициенты в уравнениях связи цветной и бесцветной воды мало отличаются друг от друга. Поэтому для оценок массы взвешенного вещества в Можайском водохранилище принято, что мутности воды 1 NTU соответствует концентрация взвеси 1 мг/л .

Исследования седиментационных потоков (СП) осуществлялись методом ловчих стаканов. Размеры стаканов и сроки экспозиции соответствовали требованиям, предъявляемым при постановке подобных экспериментов [9]. Ловушки (ловчие стаканы в 2–3 повторностях) устанавливались на дно, а также подвешивались в 4–6 м от поверхности воды. В осадке одного из стаканов определялся фракционный состав (методом сухого и мокрого рассеивания через сита с диаметром отверстий от 2 до $0,05 \text{ мм}$ с помощью электромагнитной просеивающей установки «Analusette-3», фирмы Альфред Фрич (Alfred Fritsch & Com). Осадок второго и третьего стаканов выпаривался и высушивался (при $T = 105 \text{ }^\circ\text{C}$) до постоянного веса для оценки общего количества осажденного вещества. По потере веса при прокаливании в них оценивалось содержание органического вещества. Всего была поставлена и обработана 41 серия ловушек.

В средней части водохранилища проводились наблюдения за продукционно-деструкционными процессами (на шести горизонтах) скляночным методом Винберга в кислородной модификации. За летний период было поставлено 18 продукционно-деструкционных станций. Пересчет валовой продукции, ПО и БО из единиц кислорода в единицы ОВ осуществлялся при помощи коэффициента $0,75$ [11], а в единицы углерода – с коэффициентом $0,375$ [5].

При анализе результатов наблюдений использовались данные об уровне в режиме, ежедневном притоке и сбросе воды в Можайском водохранилище и атмосферных осадках, которые были получены на Можайском гидроузле и на гидрометеорологическом посту Красновидовской УНС МГУ и любезно предоставлены В.В. Пуклаковым. В дни, когда отсутствовали прямые наблюдения скорости ветра, использовались сведения о погоде с сайта www.rp5.ru.

Краткая характеристика водоема

Можайское водохранилище расположено в верховьях р. Москвы в 120 км к северо-западу от г.Москвы. Водоохранилище вытянуто с северо-запада на юго-восток (рис. 1), имеет извилистую береговую линию, глубины увеличиваются от верховьев к плотине. Его ложе состоит из двух отрицательных форм рельефа – участка долины с широким дном и врезанной в него извилистой русловой ложбиной [12]. В нем наблюдается температурная стратификация водной толщи на протяжении большей части летнего периода, свойственная глубоководным водохранилищам со слабым водообменом.

Длина водохранилища 28 км (43 км по затопленному руслу реки); площадь при НПУ 30,7 км²; объем 0,24 км³; максимальная глубина 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 (Кв) равен в среднем 1,8 год⁻¹ [12]. Скорость стокового течения <2–3 см/с, в зоне выклинивания подпора – до 30 см/с. Скорость плотностного придонного потока летом может достигать 12 см/с [14].

Для водохранилища характерны значительные сезонные колебания уровня воды, приводящие к изменению гидравлических условий [6]. Коэффициент водообмена лишь в половодье может достигать 0,5 мес⁻¹, в остальные месяцы безледного периода обычно не превышает 0,1 мес⁻¹. Половодье обычно в марте-апреле.

Первые и наиболее подробные сведения о режиме взвешенного вещества относятся к 1967–68 гг. (спустя 7 лет после создания водохранилища) [6]. Наиболее высокая концентрация взвесей (20–60 мг/л) в водохранилище отмечалась в период весеннего половодья. Летом количество и распределение взвешенного вещества весьма неустойчиво и быстро меняется в соответствии с изменением метеорологических условий, в среднем составляя 3–9 мг/л и лишь в периоды «цветения» водохранилища на отдельных участках достигая 20–25 мг/л. ПО воды составляла 2,6–2,9 мгС/л, БО – 3,3–9,6 мг С/л.

Донные отложения Можайского водохранилища относятся к вторичным неорганическим грунтам [10]. Они представлены глинистыми серыми и песчанистыми илами, илистым песком и песком [4].

Граница распространения илистых отложений определяется глубиной размывающего действия волнения, которое при средней многолетней сработке в безледный период ограничивается изобатой 4,5–5,0 м. В нижнем районе волнение достигает больших размеров и зона размыва дна распространяется до глубины 6,0–8,0 м. На этом месте образуются илистые пески [12].

Результаты исследований и их обсуждение

В 2008–2009 гг. на Можайском водохранилище проводился ремонт гидроузлов, в связи с чем поддерживался пониженный уровень воды (летом 2008 г. – на 6,5 м, а в 2009 г. – на 4,5 м ниже НПУ). Поэтому прибрежная зона абразионного берега представляла собой обнаженную аккумулятивную отмель, сложенную крупно- и среднезернистым песком, лишенным органических частиц грунта.

В первый год ремонтных работ происходило активное переотложение ДО, вымывание и перенос илистых частиц вглубь водоема. Мутность воды в поверхностном слое в средней части водохранилища летом достигала 20 мг/л при слабом развитии фитопланктона. В первую половину лета 2009 г. (до середины июля) короткие (1–3 дня) периоды прогрева сменялись недолгими (до 1 недели) периодами похолодания. Это сопровождалось повышенной ветровой активностью (скорости ветра достигали 5–6 м/с). Часты были холодные ночи, что вызывало ночную конвекцию. Глубина слоя скачка плотности в отдельные дни достигала 9 м (при максимальной глубине 10,7 м). Во второй половине июля – начале августа установилась теплая маловетренная (скорости ветра < 2 м/с) погода. Это привело к возникновению устойчивой стратификации со слоем скачка плотности на глубине 3–4 м. В штилевую погоду возникал и подповерхностный слой скачка плотности. В августе (днем при теплой погоде) происходило конвективное перемешивание. Ночью усиливалось ветровое воздействие (скорость ветра достигала 5 м/с), что приводило к заглублению слоя скачка плотности до глубины 6,5–9 м.

За время наблюдений в водохранилище поступило несколько крупных (объемом до 20 млн м³) паводков (май-июнь). При этом уровень воды в водохранилище изменялся незначительно - от 178,36 до 178,85 м абс. (в среднем 178,50 м абс.) (табл. 1).

Таблица 1

Гидрометеорологические характеристики Можайского водохранилища летом 2009 г.
($\Delta H = H_{\text{ср.мес}} - H_{\text{НПУ}}$) (лед сошел 27.04)

Месяц	ΔH , м	Приток, млн м ³	Кв, мес ⁻¹	Скорость ветра, м/с	Сумма осадков, мм
Апрель	-5,4	106	0,79		13
Май	-4,4	112	0,95	1,9	86
Июнь	-4,4	64	0,53	3,0	71
Июль	-4,6	28	0,24	1,3	78
Август	-4,3	18	0,10	2,7	55

В летние месяцы 2009 г. коэффициент водообмена составлял от 0,53 мес⁻¹ в июне до 0,24 и 0,10 мес⁻¹ в июле и августе. Скорости стоковых течений, оцененные по прохождению паводков по русловой ложбине (рассчитанные с учетом разной величины сбросов воды через гидроузел) изменялись от 0,2 до 11,4 см/с. Средние скорости стоковых течений, рассчитанные по величине коэффициента водообмена [8], составляли от 0,06 до 2,54 см/с.

Величина ПО в Можайском водохранилище изменялась от 4,7 до 6,5 мгС/л. Минимальные значения наблюдались в конце июня, максимальные – в августе. Величина БО колебалась от 8,3 до 19,9 мгС/л, достигая максимальных величин во второй половине июля, когда в водохранилище отмечалась устойчивая стратификация и активно развивались сине-зеленые водоросли. ЦВ в водохранилище была повышена. В начале июня она составляла 75–90°, и лишь в гипolimнионе приплотинного района снижалась до 35°. В течение лета ЦВ постепенно снижалась до 45–50° (в конце июля). Во второй половине августа ее значения немного повысились, что связано со взмучиванием ДО в результате ветро-волнового воздействия на дно и отмиранием сине-зеленых водорослей.

Валовая продукция фитопланктона в верхнем слое воды в средней части водохранилища изменялась от 0,01 до 0,13 мгС/л ч, увеличиваясь во второй половине лета.

В речной части (ст. Горки) колебания количества взвесей в воде (от 7 до 12 мг/л) происходили в соответствии с величиной притока. Среднее содержание взвесей в водохранилище снижалась от 11 мг/л в начале июня до 7–9 мг/л в июле, а в середине августа вновь увеличилась до 13 мг/л. В течение лета наибольшие средневзвешенные по объемам плесов величины мутности наблюдались в верхнем районе. К плотине она уменьшалась, при этом наибольший диапазон колебаний концентрации взвесей отмечался в приплотинном плесе. Максимальное содержание взвесей в этом районе отличалась от минимально наблюдаемого более чем в 2,5 раза, в то время как в верховьях это отношение составило 1,5 раза. Как видно на рис. 2, в придонной области по всей длине водохранилища наблюдались наибольшие по вертикали концентрации взвесей, а в периоды активного развития фитопланктона (рис. 2в) повышенное содержание взвесей отмечалось и в верхних слоях.

Корреляционный анализ всех имеющихся данных по содержанию взвесей в воде не выявил зависимостей средневзвешенной по плесу концентрации взвеси от валовой продукции фитопланктона. Величина притока воды в водохранилище влияет на содержание взвеси лишь в зоне выклинивания подпора ($r = 0,62$, $n = 7$). Средняя концентрация взвеси уменьшалась с увеличением средней глубины рассматриваемого плеса ($r = -0,69$, $n = 39$). На всех станциях отмечалась положительная зависимость содержания ВВ от скорости ветра, которая несколько ослаблялась с увеличением глубин (коэффициент корреляции уменьшался по мере продвижения к плотине от 0,84 до 0,60 при $n = 6-13$). В наиболее глубоких районах водохранилища отмечена положительная корреляция среднего содержания ВВ от толщины перемешанного слоя воды ($r = 0,76-0,95$ при $n = 6$).

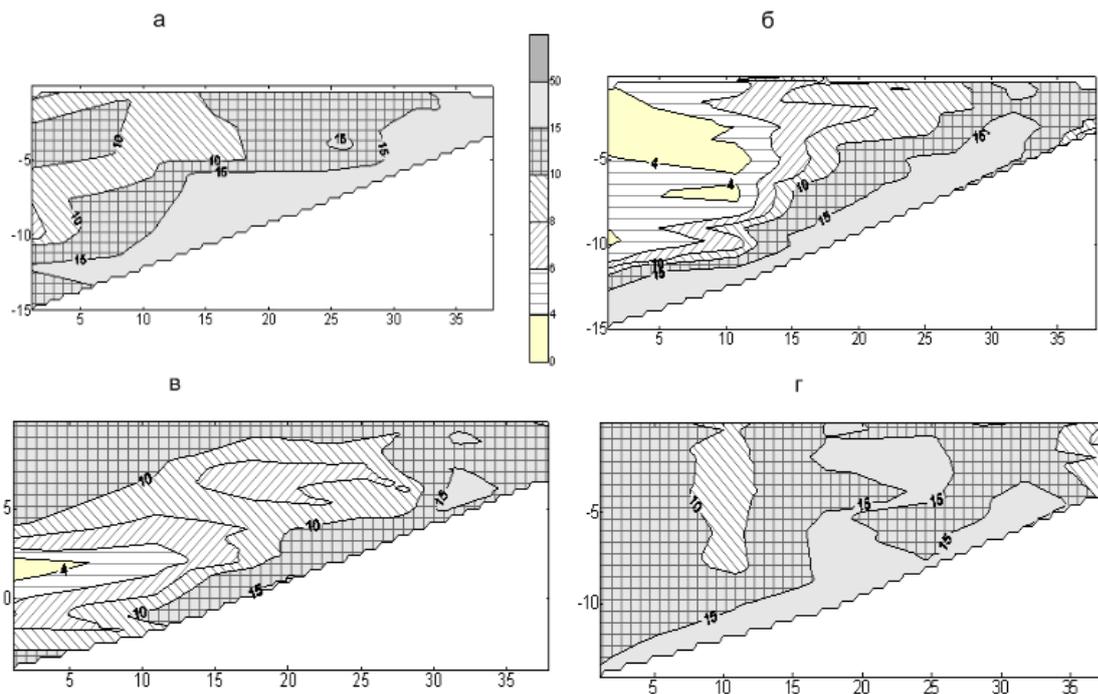


Рис. 2. Изменения содержания ВВ (мг/л) по длине Можайского водохранилища 05.06.09 (а), 27–28.06.09 (б), 22.07.09 (в) и 17.08.09 (г)

По результатам съемок содержания взвесей на реперных точках в разных частях водохранилища (рис.3) получена зависимость средневзвешенного по плесу содержания ВВ от скорости ветра и средней глубины плеса, что указывает на важную роль ветро-волнового взмучивания донных отложений как источника взвесей в Можайском водохранилище.

Донные отложения русловой ложбины Можайского водохранилища летом 2009 г. были представлены серыми илами, на пойменных станциях – песчанистыми серо-коричневыми илами. Естественная влажность верхнего (0–1 см) слоя ила русловой ложбины увеличивалась от верховьев к плотине в среднем за лето от 66,5 до 71,6 %. Содержание ОВ в них изменялось от 11,5 до 12,5 %. В составе ДО основную долю (около 90%) составляла фракция <0,05 мм. Естественная влажность ДО и содержание в них ОВ на пойменных станциях снижались от верховьев к плотине. Однако доля мелкодисперсной фракции была максимальна в среднем районе. Наименьшие естественная влажность и содержание ОВ отмечены для ДО надпойменной террасы приплотинного района, представленной заиленным песком. В составе этих ДО преобладали частицы с размером >0,1 мм.

По данным седиментационных ловушек, установленных на дно в русловой ложбине в разных частях водохранилища, в конце июня – начале июля максимальные величины СП наблюдались в средней части водохранилища, где доля фракций <0,05 мм в течение лета составляла 84–94 % (рис. 4 а, б).

Учащенные наблюдения за режимом мутности в Красновидовском плесе показали, что в течение лета содержание взвесей в воде составляло 7–36 у дна и 8–20 мг/л в верхнем слое воды. Величина СП в русловой ложбине изменялась в течение лета от 70 до 170 г/м²сут (рис 4б), на пойменных станциях – от 33 до 94 г/м²сут (рис. 4в) при размахе содержания ОВ от 11,0 до 16,1%.

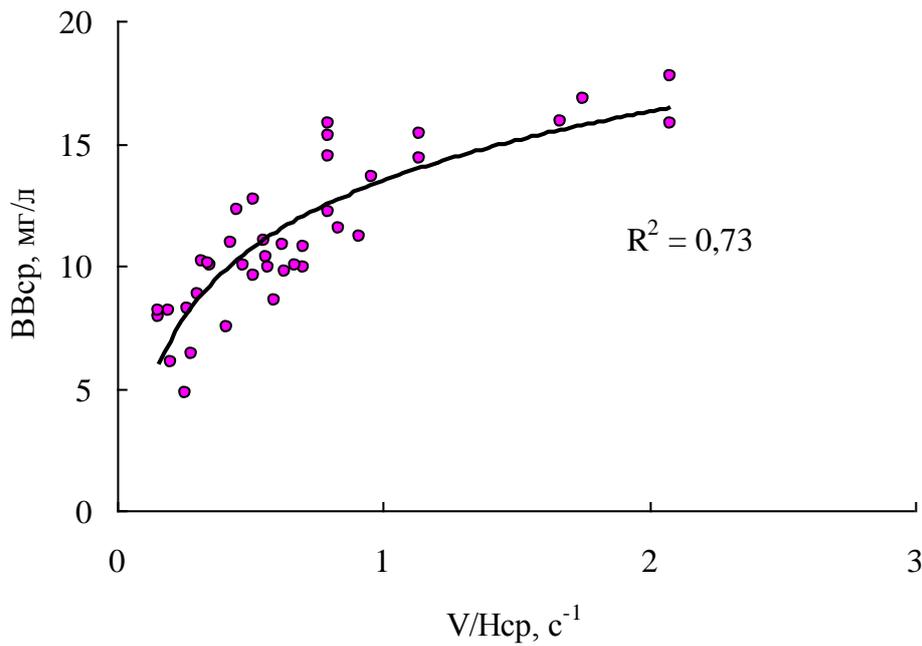


Рис. 3. Зависимость средневзвешенной по плесам концентрации ВВ (мг/л) от скорости ветра и средней глубины плеса в разных районах Можайского водохранилища летом 2009 г.

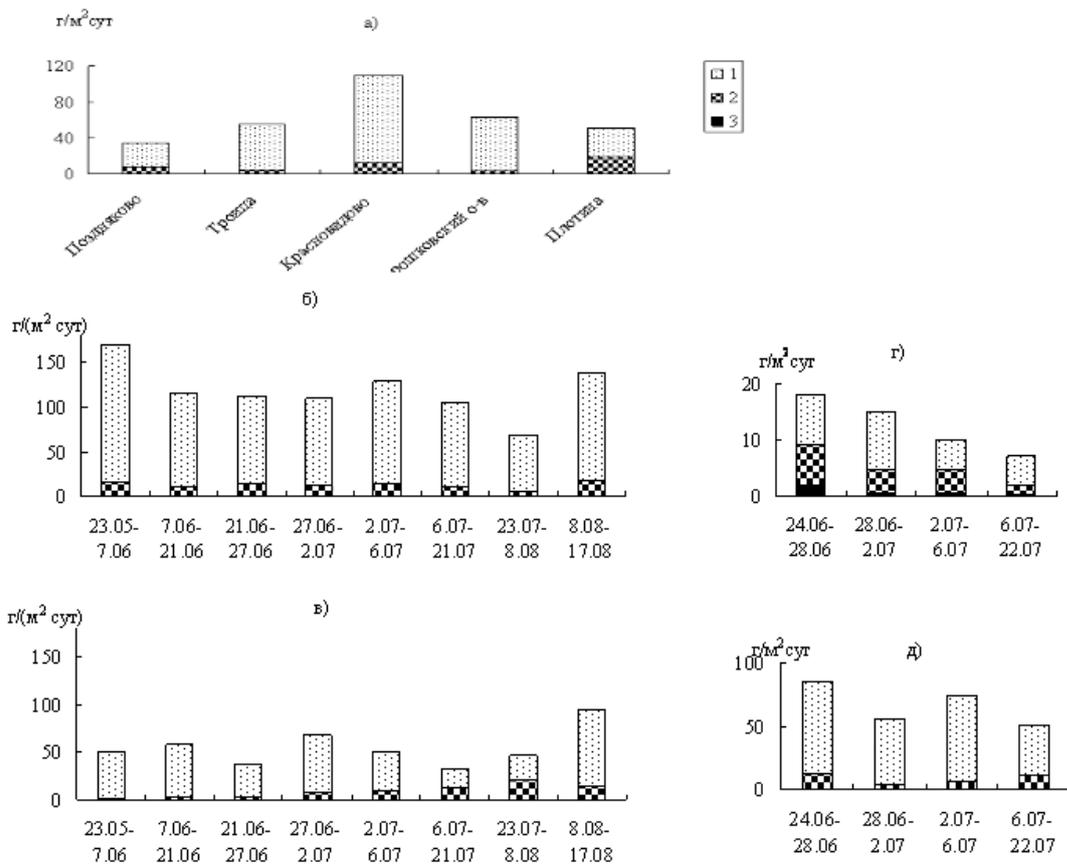


Рис. 4. Изменение величины седиментационных потоков на русловых станциях Можайского водохранилища 27.06-02.07 (а), на русловых (б) и пойменных (в) станциях Красновидовского плеса, в толще воды (г) и в русле (д) в районе ст. Троица летом 2009 г. (разной штриховкой показаны доли фракций осадка ловушек: <0,5 мм (1), 0,5-0,05 мм (2), >0,5 мм (3))

езультаты анализа изменения величин СП в ДО в среднем районе в течение лета показали, что для русловых станций величина седиментационных потоков увеличивается в периоды повышенной ветровой активности ($r = 0,85, n = 8$), при которой происходит повышение запаса взвешенного в водной толще вещества за счет взмучивания ДО, и снижается с усилением стратифицированности водной толщи ($r = -0,64, n = 8$). Содержание мелкодисперсной фракции в осадке ловушек увеличивается при большей ветровой нагрузке на водоем ($r = 0,85, n = 8$), а доля ее в осадке растет при усилении стратифицированности водной толщи ($r = 0,65, n = 8$). По-видимому, при усилении стратификации в изолированном гипolimнионе на дно русловой ложбины оседает преимущественно взмученное вещество ДО. Мутность придонной воды в русловой ложбине увеличивается с ростом скорости ветра ($r = 0,63, n = 18$). Связи мутности придонной воды с изменениями проточности водохранилища не было обнаружено. Другими словами, в среднем районе происходил в основном поперечный перенос взвесей (трансседиментация) с мелководных участков вглубь плеса, а не продольный – из вышележащего района.

На пойменных станциях доля фракции $<0,05$ мм в осадке ловушек в целом также увеличивалась при больших скоростях ветра ($r = 0,63, n = 8$). Однако, в отличие от русловых станций, на пойме в осадке придонных ловушек доля более крупных частиц с размером $0,5-0,05$ мм достигала в отдельные периоды 43%. Поступление на дно этих частиц увеличивалось с ростом валовой продукции фитопланктона ($r = 0,86, n = 8$). Следовательно, эта размерная группа, очевидно, характеризует органоминеральные образования, формирующиеся в процессе жизнедеятельности планктонных организмов.

Коэффициент корреляции r величины СП на пойменных станциях с мутностью верхнего двухметрового слоя воды, равный $0,73$, при $n = 8$, показывает, что в ловушки на пойменных станциях попадает преимущественно взвешенное вещество, распределенное в толще воды. Расположение входного отверстия седиментационных ловушек в 70 см от дна препятствует попаданию в ловушки, расположенные на пологом склоне затопленной поймы, перемещающейся в придонном слое воды взвеси. При этом в ловушки, расположенные в русловой ложбине, попадает ВВ, не только оседающее с верхних горизонтов, но и «сливающееся» с бортов русловой ложбины.

Таким образом, можно оценить вертикальную составляющую седиментационного потока в русловую ложбину (СП_в) по формуле

$$\text{СП}_в = \text{СП}_п / \text{Н}_п - \text{Н}_р,$$

где $\text{Н}_п$ и $\text{Н}_р$ – глубины пойменного и руслового участков. Это представляется возможным еще и потому, что разница в средней концентрации взвеси на четырех пойменных станциях и среднего содержания ВВ над русловой ложбиной (до глубины, соответствующей глубинам пойменных станций) не превышала 4 %.

По разнице суммарного СП в русловую ложбину и его вертикальной составляющей оценена квазигоризонтальная составляющая (СП_г) в ДО русловой ложбины. Вклад оцененной таким образом квазигоризонтальной составляющей достигал 50 % суммарного потока на дно русловой ложбины.

Чтобы оценить величину седиментационного потока в толще воды, параллельно с придонной ловушкой, расположенной в русловой ложбине на ст.Троица на глубине 7 м, на буге укрепляли и ловушку, подвешенную в толще воды на горизонте 4 . Поскольку за период экспозиции происходили изменения синоптической обстановки, вызывавшие изменения гидрологической структуры водной толщи, закрепленная ловушка могла «попадать» в разные слои водной толщи (эпилимнион, металимнион или гипolimнион).

На рис. 4 г, д представлены величины СП и фракционный состав осадка ловушек, расположенных на дне и в водной толще на ст.Троица. Величина СП в русловой ложбине так же, как и в Красновидовском плесе, увеличивалась в ветреные дни (корреляция СП и средней за экспозицию скорости ветра составила $0,99$ при $n = 4$). В осадке ловушек, размещенных в толще воды наблюдались значительно более высокие по сравнению с донными ловушками, доли фракции $0,5-0,05$ мм. Доля фракции $<0,05$ в толще воды не превышала 72 % (рис. 4г), причем максимальные значения наблюдались при повышенной устойчивости столба воды над ловушкой (использовался квадрат частоты Вэйсаяля-Брента [3]), т.е. когда ловушка оказывалась в гипolimнионе.

Разница в содержании фракции $<0,05$ мм в ловушках, расположенных в толще воды и на дне, увеличивалась с ростом средней за экспозицию ловушек скорости ветра, т.е. при усилении ветрового воздействия в придонной области происходило увеличение содержания тонкодисперсной фракции по

сравнению с вышележащими слоями. Следовательно, основным источником мелкодисперсной фракции были ДО, взмучиваемые при усилении ветра.

В первую половину лета (при прохождении паводков) максимальное содержание ОВ в илах русловой ложбины наблюдалось в средней части водохранилища, где оказались наибольшие величины СП, а в конце лета (при небольшой величине речного притока) – в верховьях водохранилища.

В водохранилище отмечено довольно высокое содержание ОВ в илах русловой ложбины (10–14%) по сравнению с таковым в близкий по уровню воды 1996 г. (5,7–8,5%) [4]. Среднесуточные значения первичной продукции фитопланктона ($ПП_{вал}$) в верхнем слое воды в 2009 и 1996 г. различались незначительно (0,15 и 0,12 мг С/л соответственно). Коэффициент водообмена в 1996 г. был существенно меньше, чем в 2009 г. (в апреле–июне 1996 г. K_v снижался от 0,34 до 0,05 мес⁻¹). Таким образом, содержание ОВ в илах зависит от поступления органики с притоком, а не от первичной продукции фитопланктона.

Это подтверждается еще и тем, что, несмотря на то что максимальные величины $ПП_{вал}$ наблюдались во второй половине лета, наибольшее содержание ОВ практически на всех русловых станциях в 2009 г. отмечалось в конце июня (при максимальной ЦВ в начале лета) после периода с повышенной ветровой активностью, когда наблюдались высокие величины СП в ДО.

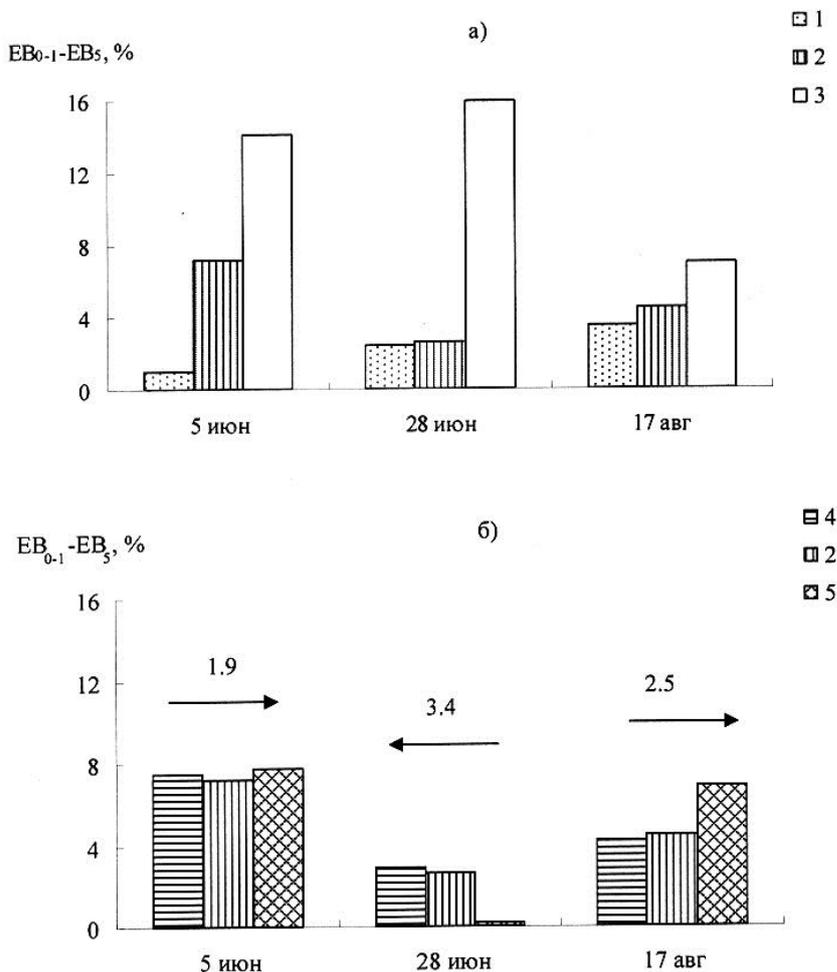


Рис. 5. Изменения градиента ОВ по длине Можайского водохранилища на русловых: 1 – ст. Поздняково, 2 – ст. Красновидово, 3 – ст. Плотина – и пойменных: 4 – Красновидово ПБ, 5 – Красновидово ЛБ – станциях Можайского водохранилища летом 2009 г. (стрелки - преобладающее направление ветра относительно станций, цифры над стрелками – скорость ветра, м/с)

Взмученное вещество ДО, видимо, вызывало сосаждение автохтонной взвеси и растворенного в воде ОВ путем адсорбции на органических мелкодисперсных частицах, которые составляли большую часть осадка ловушек. В начале лета 2009 г. в Красновидовском плесе при низкой $ПП_{вал}$ и высокой ЦВ (до 70°) наблюдались довольно высокие величины потоков ОВ в ДО (до 9,7 г/м²сут при том, что в среднем по плесу, поток ОВ в летний период 2009 г. изменялся от 4,4 до 11,2 г/м²сут).

Анализ содержания ОВ в осадке ловушек, расположенных на дне затопленной поймы, где осуществляется преимущественно вертикальное осаждение взвеси, показал, что содержание ОВ в осадке ловушек при скоростях ветра более 1 м/с увеличивается с ростом доли мелкодисперсной фракции (< 0,05 мм) ($r = 0,86, n = 7$), доля которой увеличивается при усилении ветрового воздействия ($r = 0,79, n = 8$). Поскольку содержание ОВ в верхнем слое ДО пойменных участков было около 8 %, а в осадке ловушек оно достигало 16%, можно предположить, что поступление ОВ в ДО связано с осаждением адсорбированного на взмученных мелких илистых частицах взвешенного и растворенного в водной толще ОВ.

Для косвенной оценки скорости осадконакопления в водоеме можно также использовать и градиент ЕВ донных отложений. При быстро накапливающимся осадках происходит наслаивание все новых и новых порций свежего грунта без достаточного их уплотнения (градиент влажности по вертикали невелик). При небольших скоростях осадконакопления влажность характеризуется быстрым падением ее по вертикали [7]. По мере приближения к плотине и, соответственно, с возрастанием глубины водохранилища увеличивается и разница в величинах ЕВ слоев ДО (в поверхностном слое и на глубине 5 см) (рис. 5а).

Судя по градиенту ЕВ верхнего (0–1 см) слоя отложений и нижнего (5–6 см), наибольшая скорость осадконакопления в русловой ложбине – в зоне выклинивания подпора, наименьшая – в приплотинном районе. Причем если в начале лета в конце половодья, проходившего в условиях низкой ветровой активности, градиент ЕВ в верховьях и у плотины различался в 14 раз, то к концу лета – лишь в 2 раза, что свидетельствует об увеличении темпов осадконакопления в приплотинном районе во второй половине лета. В средней части водохранилища в конце июня после периода высокой ветровой активности градиент естественной влажности практически совпадает с таковым в верховьях.

Изменение градиента ЕВ по ширине Красновидовского плеса (рис. 5б) показывает, что в зоне даунвеллинга (нагона) (в подветренной стороне) наблюдаются минимальные скорости осадконакопления (наибольшие градиенты ЕВ), т.к. образующиеся внутривпесовые компенсационные течения взмучивают ДО и переносят взвеси к противоположному берегу. И чем больше скорость ветра, тем более интенсивно это происходит.

Для оценки соотношения адвективных, седиментационных и трансседиментационных потоков в разных частях водохранилища по имеющимся данным были рассчитаны ориентировочные балансы ВВ в разных районах водохранилища по формуле

$$S_{\text{нач}} - S_{\text{кон}} = П_{\text{вал}} + V_{\text{бп}} + V_{\text{пр}} + V_{\text{взм}} - V_{\text{сед}} - V_{\text{от}},$$

где $S_{\text{нач}}$, $S_{\text{кон}}$ – масса взвеси в начале и в конце расчетного периода, $П_{\text{вал}}$ – первичная продукция фитопланктона, $V_{\text{бп}}$, $V_{\text{пр}}$, $V_{\text{от}}$ – масса взвеси, поступающей с боковым притоком, поступление из верхнего района и сброс в нижний, соответственно, $V_{\text{взм}}$ – величина взмученной взвеси, $V_{\text{сед}}$ – величина осевшей на дно взвеси.

При отсутствии абразии берегов по известным членам балансового уравнения оценена величина $V_{\text{взм}}$. $S_{\text{нач}}$ и $S_{\text{кон}}$ рассматриваемого расчетного периода вычислялись по объемной кривой плеса и содержанию взвеси, осредненному по всем имеющимся точкам ее измерения. Вклад $П_{\text{вал}}$ рассчитывался по измеренным значениям в средней части водохранилища. Балансовые расчеты велись для небольшого периода времени (4 сут), поэтому было принято, что все образованное в результате фотосинтеза ОВ сохраняется во взвешенном состоянии. Для ориентировочного учета продукции зоопланктона эта составляющая увеличивалась на 10% [12]. Поскольку расчет проводился для бездождевого периода, величина $V_{\text{бп}}$ рассчитывалась по зависимости расхода взвеси R от расхода воды Q по формуле

$$R = 1,95 \cdot Q^{1,65},$$

Q – расход воды, равный произведению площади водосбора плеса на слой выпавшей дождевой воды [12]. Оценка поступления взвеси из вышележащего района $V_{\text{пр}}$ и ее сброса в нижнюю часть водохранилища $V_{\text{от}}$ выполнялась путем умножения величины притока воды в плес (район) и ее оттока на среднюю за период расчета концентрацию ВВ (мг/л) в вышележащем (для ст. Поздняково в речной части) и исследуемом плесах соответственно. Приток и отток воды в плес рассчитывался по данным о ежесуточном объеме сброса воды Можайским гидроузлом с учетом небольших колебаний уровня воды за расчетный период. $V_{\text{сед}}$ рассчитывалась суммированием произведений СП над руслом и над поймой на соответствующие им части площади дна по данным ловушек.

Для разных районов водохранилища расчет проводился для краткосрочного бездождевого периода со среднесуточными скоростями ветра, не превышавшими 2,5 м/с. На рис. 6а видно, что в средней и

нижней частях водохранилища практически половина и более поступления ВВ в толщу воды происходит за счет взмучивания ДО. Продольная адвекция взвеси составляет более половины приходной и расходной частей баланса лишь в зоне выклинивания подпора.

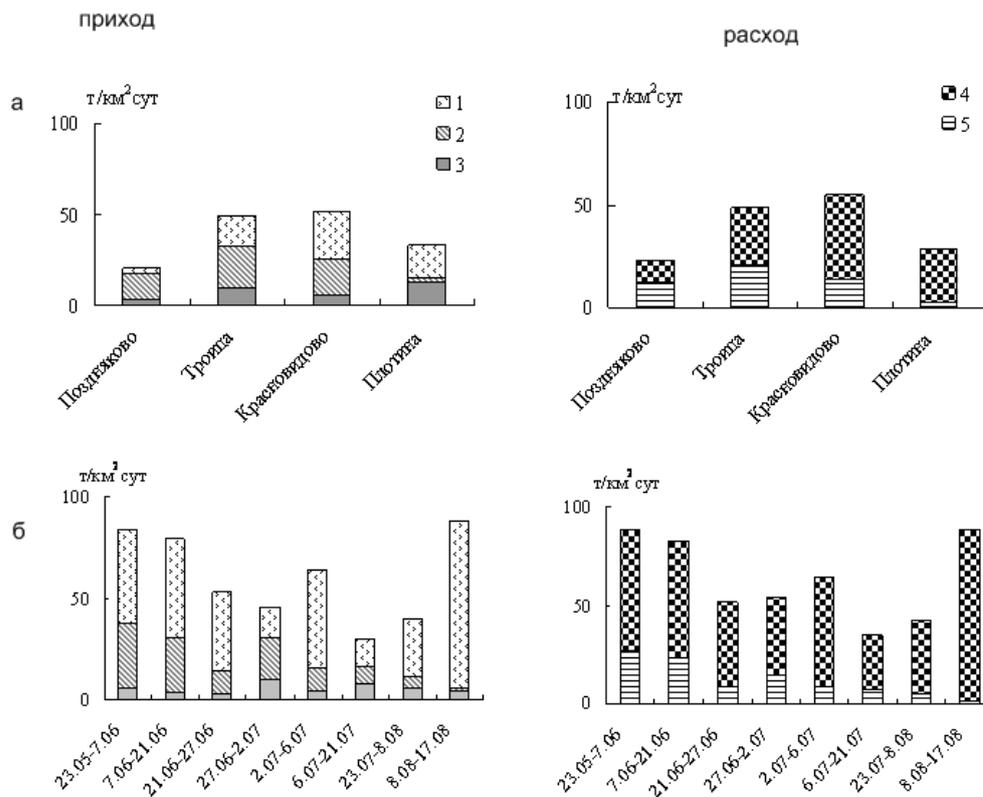


Рис. 6. Структура ориентировочного баланса ВВ на реперных станциях Можайского водохранилища за период 28.06-02.07.09 (а) и в Красновиждовском плесе (б) летом 2009 г. (приходная часть баланса: взмучивание ДО (1), поступление взвеси из вышележащего района (2), валовая продукция фитопланктона (3); расходная часть: седиментация (4), отток взвеси в нижележащий район (5))

Расчеты краткосрочных балансов ВВ в средней части водохранилища (рис. 6б) показали, что даже в маловетренную погоду при пониженном уровне воды более 40 % взвешенного вещества поступает в толщу воды по причине взмучивания ДО. Исследования изменений рассчитанной величины ориентировочно рассчитанного взмучивания ДО в течение лета в средней части водохранилища подтвердили, что увеличение взмучивания ДО происходило в периоды с повышенной ветровой активностью ($r = 0,83$, $n = 8$).

Выводы

Понижение уровня воды Можайского водохранилища в 2008 г. (6 м) и 2009 г. (4,5 м) в связи с ремонтом гидроузлов в условиях средней водности способствовало активизации гидродинамических процессов, что привело к увеличению мутности воды, переотложению наносов и ухудшению качества воды – повышенным значениям ПО и цветности воды.

При уровне воды ниже НПУ в формировании режима взвесей в летний период важную роль играет взмучивание ДО, вклад которого в верхнем районе водохранилища сопоставим со вкладом первичной продукции фитопланктона, а в среднем и нижнем районах превышает его. Продольная адвекция взвесей играет существенную роль лишь в зоне выклинивания подпора. В остальной части водохранилища более важную роль играет поперечный (внутриплесовый) перенос взвеси.

Взмучивание ДО в периоды усиления ветровой активности приводит к увеличению содержания ОВ в илах водохранилища за счет адсорбции на мелкодисперсных минерально-органических частицах и соосаждения растворенного в воде ОВ, содержание которого летом 2009 г. было повышенным.

Работа имеет важное теоретическое и прикладное значение в гидроэкологии при решении проблем регулирования уровня воды, восстановления, реконструкции и улучшения санитарного состояния осушенных и прибрежных территорий.

Библиографический список

1. *Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А.* Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 269 с.
2. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
3. *Бреховских В.Ф.* Гидрофизические факторы формирования кислородного режима. М.: Наука, 1988. 167 с.
4. *Бреховских В.Ф., Гашкина Н.А., Ломова Д.В., Шакирова Е.Р.* Влияние степени наполнения долинного водохранилища на интенсивность процессов, происходящих на границе раздела вода–донные отложения // Вод. ресурсы. 1999. Т. 26, № 1. С. 55–59.
5. *Винберг Г.Г.* Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
6. *Виноградова Н.Н.* Особенности формирования и динамики взвешенного вещества в малых водохранилищах Москворецкой системы: дисс. канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1970. 282 с.
7. *Выхристюк Л.А.* Естественная влажность донных отложений озера Байкал // Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1975. С. 238–242.
8. *Денисова А.И., Нахшина Е.П., Новиков Б.И., Рябов А.К.* Донные отложения водохранилищ и их влияние на качество воды. Киев: Наук. думка, 1987. 164 с.
9. *Дубовская О.П.* Методологические основы использования седиментационных ловушек в морских и континентальных водоемах // Гидробиол. журн. 2002. Т. 38, № 5. С. 98–110.
10. *Курдин В.П.* О классификации и происхождении грунтов водохранилища // Биология внутренних вод. 1960. № 8. С. 9–119.
11. *Леонов А.В., Бердавецва Л.Б.* Органическое вещество в воде Можайского водохранилища: оценка его трансформации по кинетическим параметрам БПК // Вод. ресурсы. 1990. № 3. С. 63–80.
12. Можайское водохранилище. Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. Вып. III. 400 с.
13. *Остапеня А.П.* Полнота окисления органического вещества водных беспозвоночных методом бихроматного окисления // Докл. АН БССР. 1965. Т.9. Вып. 4. С. 273–276.
14. *Самолубов Б.И. и др.* Распространение стратифицированных течений в равнинных водохранилищах // Вод. ресурсы. 2001. Т. 28., № 2. С. 141–147.

E.P. Kremenetskaya, V.V. Zakonnov, D.V. Lomova, D.I. Sokolov

THE STRUCTURE OF INTRA-WATERBODY FLOWS OF SUSPENDED AND ORGANIC MATTERS IN THE MOZHAISK RESERVOIR

The quantitative assessment of variability of physical and chemical characteristics of the composition and concentrations of suspended matter and bottom sediments was made on the basis of the data of the hydrological survey of the Mozhaik Reservoir in 2009. The formation of organic matter as a result of phytoplankton production, its sedimentation in the course of sedimentation processes and concentrations of organic matter in water and bottom sediments were studied. Preliminary sedimentation balances were estimated for four regions in the reservoir in which values of stirring-up of suspended matter from the bottom were obtained.

Key words: suspended matter; bottom sediments; transsedimentation; operation regime; drinking water reservoirs; water quality.

Ekaterina P. Kremenetskaya, Candidate of Geography, Research Worker of Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences; 3 Gubkina, Moscow, Russia 119333; ekrem@front.ru

Viktor V. Zakonnov, Doctor of Geography, Chief Research Scientist of Laboratory of Hydrology and Hydrochemistry of Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences; Borok, Nekouz, Yaroslavl, Russia 152742; zak@idiw.yaroslavl.ru

Diana V. Lomova, Candidate of Geography, Research Worker of Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences; 3 Gubkina, Moscow, Russia 119333; florainter@mail.ru

Dmitri I. Sokolov, Research Worker of Moscow State University by M. V. Lomonosov; Leninskie gori, Moscow, Russia 119991; fabulist@list.ru