

О РОЛИ взмучивания **ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ** в БАЛАНСЕ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА в **Можайском водохранилище** в ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

На основе натуральных наблюдений за режимом взвешенного вещества и определяющими его факторами оценена интенсивность и выявлена роль взмучивания донных отложений в балансе взвешенного вещества при разных синоптических условиях в летний период. Получены статистические зависимости интенсивности седиментационных потоков от содержания взвесей, доли в них органических веществ и стратификации водной толщи. Предложена модель режима взвешенного вещества.



Введение

Количество и состав взвешенного вещества (**ВВ**) играют важную роль в водных объектах — взвешенные частицы уменьшают прозрачность воды, влияют на проникновение в нее света, на ее температуру, интенсивность сорбции растворенных в воде веществ; от скорости седиментации взвесей зависит состав и распределение донных отложений (**ДО**).

Основными факторами, влияющими на количественные характеристики потоков **ВВ** являются: поступление взвесей с поверхностным стоком, абразия берегов, продукционно-деструкционные процессы, волновое взмучивание **ДО**, изменчивость течений, расположение термо- и пикноклина, глубина и форма ложа водоема, сезонность и синоптическая трансформация водной массы на мелководьях и в трофогенном слое периодически стратифицированной глубоководной части водоемов [1].

Е.Р. Кременецкая*,

кандидат географических наук, научный сотрудник, ФГБУН Институт водных проблем Российской академии наук

В.М. Перекальский,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт водных проблем Российской академии наук

В водохранилищах, в отличие от озер, обычны значительные колебания уровня воды как внутри года, так и межгодовые, что значительно влияет на формирование и распределение взвесей, на скорость накопления **ДО** в районах с различной удаленностью от гидроузла. Характер распределения **ВВ** в водохранилище определяется морфометрическими особенностями ложа и динамикой водных масс. Концентрация взвесей в воде водохранилища изменчива, с большой долей минеральных частиц песка и глины, что в значительной мере связано с ветро-волновым взмучиванием **ДО**.

При моделировании режима **ВВ** водоемов замедленного водообмена ресуспензия **ДО** либо не учитывается [2], либо учитывается при помощи подобранных в процессе счета коэффициентов [3]. Однако в балансе **ВВ** водохранилищ процессы абразии берегов и взмучивания **ДО** составляют 58-82 % [4].

Цель работы — на основе краткосрочных (до 2-3 недель) экспериментов по комплексному изучению факторов, формирующих режим **ВВ** в водохранилище долинного типа, оценить роль взмучивания **ДО** в режиме **ВВ**

*Адрес для корреспонденции: ekrem@front.ru

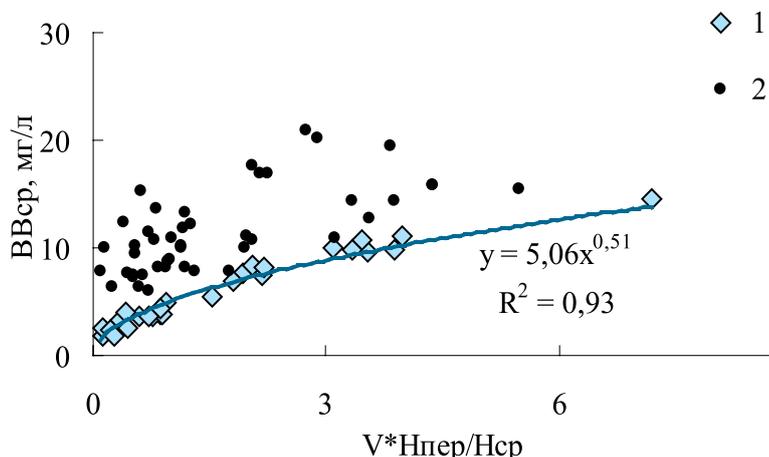


Рис. 1. Изменения средней концентрации ВВ в толще воды в разных районах Можайского водохранилища в зависимости от скорости ветра и отношения толщины перемешанного слоя воды к средней глубине района в период слабого (1) и интенсивного (2) развития фитопланктона.

и получить статистические зависимости от определяющих его факторов. Исследования режима ВВ и формирующих его факторов (продукция фитопланктона, седиментация, гидрометеохарактеристики, характеристики ДО) проводились на Можайском водохранилище в летний период в 2008 – 2011 гг.

Материалы и методы исследования

Изучение характеристик экосистемы Можайского водохранилища основывалось на данных квазисинхронных гидролого-гидрохимических и грунтовых съемок водохранилища.

Комплекс работ, проводимых на станциях, включал измерения прозрачности воды SD, температуры, электропроводности, содержания кислорода (с использованием термокондуктометра и оксиметра WTW), отбор проб (с использованием батометра) для определения растворенного в воде кислорода, мутности воды и количества в ней ВВ. С помощью дночерпателя Экмана-Берджи отбирался грунт для определения содержания в нем органического вещества (ОВ).

Определение содержания растворенного в воде кислорода проводилось стандартным методом Винклера, мутности воды – с использованием турбидиметра (2100P) в нефелометрических единицах мутности NTU, количество взвесей (мг/л) – фильтрованием через ядерные фильтры с диаметром пор

0,45 мкм. Содержание ОВ определялось по потере в весе при прокаливании [5].

По параллельным измерениям мутности воды и содержания в ней взвесей были построены графики связи этих величин.

Исследования седиментационных потоков (СП) осуществлялись методом ловчих стаканов. Седиментационные ловушки устанавливались в 2-3 точках плеса, характеризующих различные формы рельефа дна (русловая ложбина, затопленные пойма и надпойменная терраса). Размеры стаканов и сроки экспозиции соответствовали требованиям, предъявляемым при постановке подобных экспериментов [6]. Ловушки устанавливались на дно, а также подвешивались на разных горизонтах в толще воды. Осадок ловушек выпаривался и высушивался (при 105 °С) до постоянного веса для оценки общего количества осажденного вещества. По потерям веса при прокаливании в них оценивалось содержание ОВ.

В средней части водохранилища проводились наблюдения за продукционно-деструкционными процессами (на 6 горизонтах) скляночным методом Винберга в кислородной модификации. Пересчет валовой продукции из единиц кислорода в единицы ОВ осуществлялся при помощи коэффициента 0,75 [7].

При анализе результатов наблюдений использовались данные об уровненом режиме, ежедневных притоке и сбросе воды в Можайском водохранилище и атмосферных осадках, полученные на Можайском гидроузле и на гидрометеорологическом посту Красновидовской УНС МГУ.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальными наблюдениями был охвачен широкий диапазон гидрометеорологических условий: уровень воды в водохранилище в период наблюдений изменялся от крайне низкого (-6,5 м от нормального подпорного уровня НПУ) до практически полного заполнения водохранилища, условный коэффициент водообмена изменялся от 0,06 до 0,95 мес⁻¹, температура верхнего слоя воды – от 14,5 до 28,9 °С, величина максимального градиента температур в слое скачка – 0,5 до 5,5 °С/м, прозрачность воды по диску Секки – 0,5 до 2,3 м. Содержание ВВ в разных районах водохранилища изменялось от 1 до 40 мг/л.

Корреляционный анализ показал, что средневзвешенное по плесу содержание

Д.В. Ломова,
кандидат географических наук,
научный сотрудник, ФГБУН
Институт водных проблем
Российской академии наук

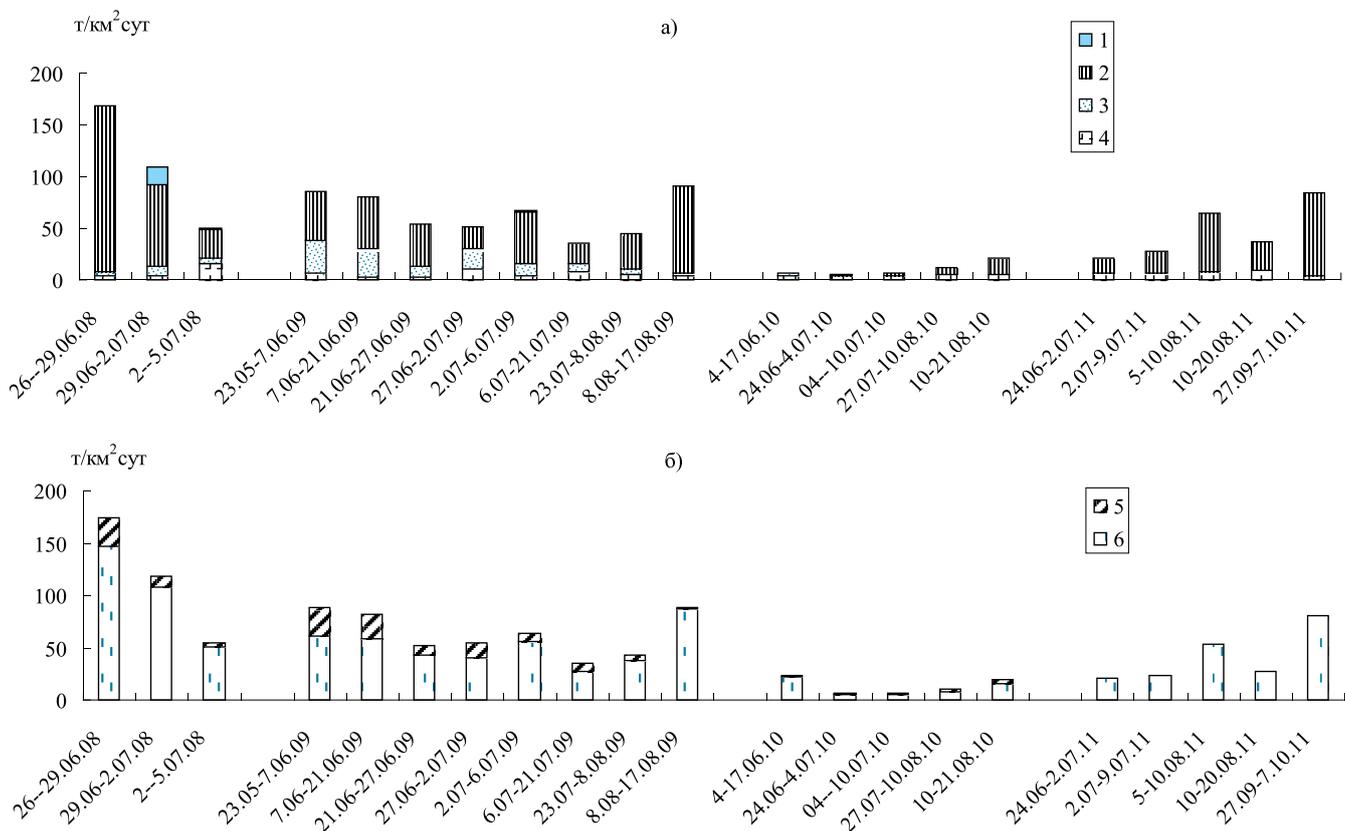


Рис. 2. Изменение составляющих приходной (а) и расходной (б) частей баланса ВВ в Красновидовском плесе Можайского водохранилища во время проведения экспериментов в 2008-2011 гг. (1 – боковой приток, 2 – взмучивание ДО, 3 – приток взвеси, 4 – валовая продукция фито- и зоопланктона, 5 – сброс взвеси в нижележащий район, 6 – седиментация).

взвесей (ВВср) увеличивается с ростом скорости ветра V (коэффициент корреляции $r = 0,47$, при количестве пар $n = 92$), и уменьшается с ростом средней глубины плеса $H_{ср}$ ($r = -0,63$, $n = 92$). Причем при одной и той же скорости ветра содержание взвесей в воде тем выше, чем больше толщина перемешанного слоя воды $H_{пер}$ (рис. 1).

При слабом развитии фитопланктона (содержание кислорода в верхнем слое воды было менее 100 %) получена статистически значимая зависимость среднего содержания ВВ от скорости ветра с учетом $H_{ср}$ и $H_{пер}$. Однако и при развитии фитопланктона увеличение скорости ветра приводит к росту содержания взвеси в толще воды. Коэффициент корреляции $ВВср$ и $V \cdot H_{пер} / H_{ср}$ равен 0,66, что при количестве членов ряда 46 статистически значимо и указывает на существенную роль взмучивания ДО в балансе ВВ Можайского водохранилища.

Подробные наблюдения за составляющими режима ВВ проводились в Красновидовском плесе (средней части Можайского водохранилища). Анализ коле-

баний величин СП на разных морфоучастках затопленной речной долины показал, что в среднем за год минимальные значения СП в ДО (12-66 г/м²сут) наблюдались на пойменных участках. Высокие значения СП (до 94 г/м²сут) на мелководьях (надпойменная терраса) объясняются волновым взмучиванием ДО, состоящих, преимущественно, из песчаных частиц, которые быстро оседают, не перемещаясь вглубь плеса. На русловых станциях отмечались максимальные значения СП (до 250 г/м²сут).

Корреляционный анализ показал, что на всех станциях и горизонтах наблюдаются статистически значимые зависимости СП от содержания ВВ ($r = 0,46$ при $n = 97$), среднего по вертикали градиента температур, показывающим стратифицированность водной толщи ($r = -0,53$ при $n = 97$) и содержания ОВ в осадке ловушек ($r = -0,40$ при $n = 97$).

По результатам экспериментов, проведенных в 2008-2011 гг., были рассчитаны ориентировочные балансы ВВ в среднем районе Можайского водохранилища и оце-

нены величины взмучивания ДО. Уровень воды во время экспериментов был ниже НПУ. Поэтому оценка взмучиваемой с поверхности ДО массы ВВ за расчётные периоды между гидрологическими съёмками плёса выполнена по балансовому уравнению (включающему в себя также продукцию фито- и зоопланктона, поступление ВВ с боковым притоком, приток взвеси из вышележащего района и отток ее в нижележащий район, седиментацию) при условии, что абразия берегов отсутствует. Оцененные значения взмучивания ДО колебались в значительных пределах от 1,3 до 177 т/км² (рис. 2). Даже при сильной стратификации водной толщи и при невысоких скоростях ветра в изолированном гипolimнионе происходило взмучивание ДО, вызванное сейшмами [8] или компенсационной составляющей ветровой циркуляции воды, которое вносило от 27 до 50 % приходной части баланса ВВ. Увеличение ветрового воздействия, особенно при похолодании, приводило к тому, что вклад взмучивания ДО достигал 95 %.

Корреляционный анализ выявил статистически достоверные зависимости изменений величины взмучивания ДО от скорости ветра ($r = 0,89$, $n = 16$), толщины перемешанного слоя воды ($r = 0,65$, $n = 16$), средней глубины исследуемого района ($r = -0,68$, $n = 16$) и среднего вертикального градиента температур воды ($r = -0,68$, $n = 16$).

Вклад продукции фито- и зоопланктона в приходную часть баланса ВВ изменялся от 2 до 63 %, увеличиваясь в периоды усиления стратификации ($r = 0,8$, $n = 16$).»

Основной расходной составляющей баланса ВВ в среднем районе Можайского водохранилища была седиментация. Лишь в периоды повышенной проточности водохранилища при пропуске паводков вклад оттока ВВ в нижележащие районы достигал 30 %.

СП в имитационных моделях складывается из потоков неорганических частиц взмученных ДО и сестона [3].

Скорость седиментации ВВ обычно задается по формуле Стокса (учитывающей гидравлическую крупность частиц, плотность среды). Величина потока рассчитывается с учетом концентрации этих частиц. Однако мелкие оседающие частицы могут «слипаться», образуя конгломераты, скорость оседания которых будет иная. В моделировании этот эффект учитывается с помощью коэффициентов, подбираемых в процессе счета [9]. Кроме того, в водоемах присутствуют

организмы фильтрующего зоопланктона, пеллеты которых часто имеют скорость оседания больше, чем у детрита или мелких илстых частиц.

Исследования, проведенные на Можайском водохранилище, показали, что на состав взвеси в воде значительное влияние оказывает стратификация водной толщи [10]. При повышении стратифицированности водной толщи увеличивается количество органического вещества в толще воды за счет увеличения продукции фитопланктона, накопления детрита и уменьшения вклада взмучивания ДО в баланс ВВ. Кроме того, в условиях повышенной стабильности водной толщи развиваются преимущественно цианобактерии, образующие колонии, которые менее пригодны для питания зоопланктона-фильтраторов (т.е. биоседиментация в таких условиях меньше). Таким образом, влияние стратификации на СП проявляется в увеличении содержания ОВ во взвесах. Скорость оседания органики меньше, чем минеральной взвеси ДО.

Для анализа влияния содержания ВВ на СП использовались все имеющиеся данные о последних как в ДО, так и в толще воды. Для нивелирования влияния разной высоты столба воды над ловушкой все величины СП были отнесены к глубине постановки ловушек (размерность СП стала г/м³час). Поскольку степень стратификации водной

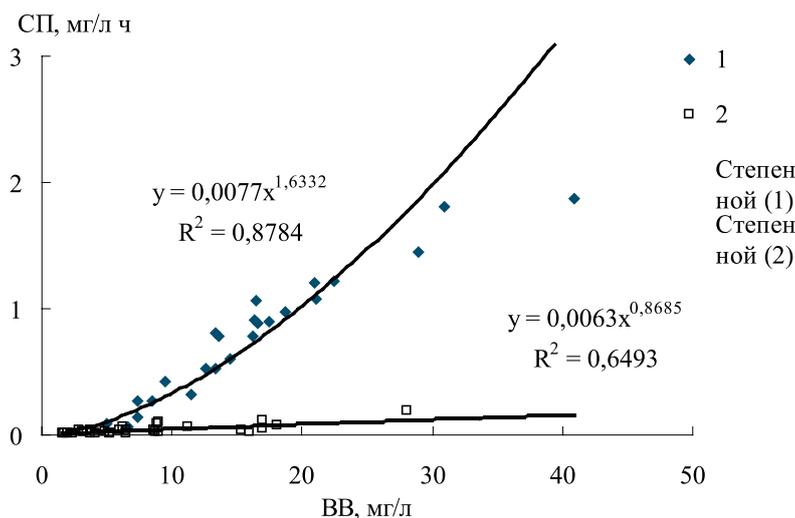


Рис. 3. Зависимость интенсивности СП от содержания взвесей (ВВ) при преобладании минеральных частиц ДО (1) и при преобладании автохтонного ОВ (2) в составе взвеси.

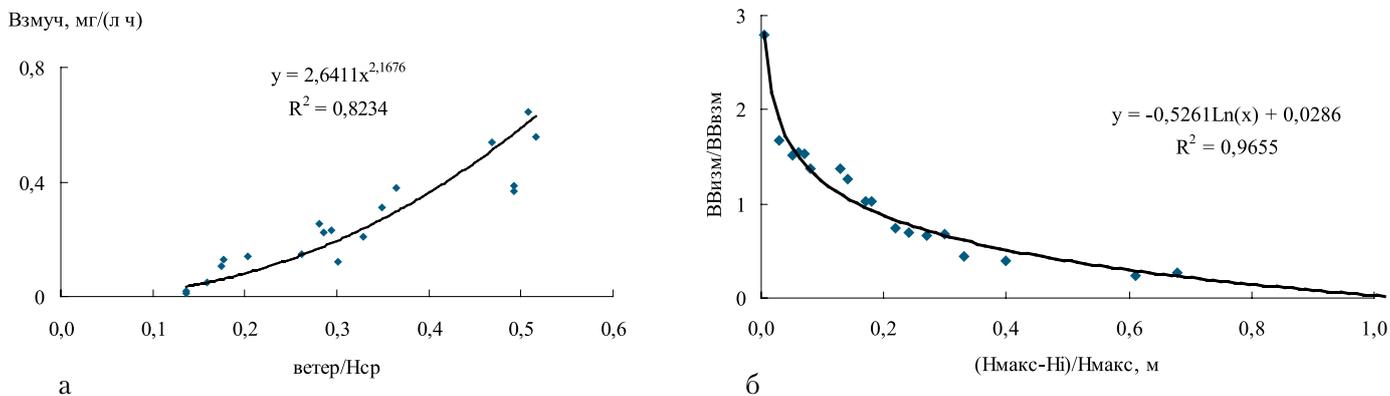


Рис. 4. Зависимость интенсивности взмучивания ДО (мг/л ч) от скорости ветра и средней глубины района (а) и распределение отношения измеренной концентрации ВВ на горизонте к средней концентрации ВВ на вертикали за счет взмучивания ДО по относительной глубине (б).

толщи определяет условия развития фитопланктонного сообщества, то для построения зависимостей интенсивности СП от ВВ все имеющиеся данные были разделены на группы.

В 2010 г. наблюдалась наибольшая стратифицированность водной толщи, а содержание ОВ в осадке ловушек достигало 60 %. Вклад первичной продукции фитопланктона в баланс взвесей превышал вклад взмучивания ДО. Поэтому эти данные использовались для построения зависимости интенсивности переноса взвеси в нижележащие слои за счет седиментации при преобладании органической взвеси над минеральной (рис. 3).

Летом 2009 г. при невысокой стратифицированности водной толщи наблюдались высокие значения взмучивания ДО. В составе взвеси преобладали тонкодисперсные частицы ДО. Содержание ОВ в осадке ловушек составляло 9-17 % и даже в толще воды не превышало 20 %. Поэтому на основе данных, полученных в 2009 г., была построена зависимость интенсивности СП от содержания взвесей при преобладании в составе взвеси взмученного вещества ДО. Таким образом, получена статистическая зависимость вида $СП = a \cdot ВВ^b$, где коэффициент a связан с содержанием ОВ во взвеси, что сказывается на скорости оседания частиц, коэффициент b обратно связан с величиной устойчивости столба воды, определяющей условия развития планктона.

На основе полученных эмпирико-статистических зависимостей был разработан блок режима ВВ к математической модели

термогидродинамического и кислородного режимов Можайского водохранилища [11].

Программный комплекс разработан в двумерной по вертикали постановке. Используется нестационарная система уравнений гидродинамики и массопереноса, усредненных по ширине водоема. В уравнениях массопереноса в качестве искомых скалярных функций являются температура и концентрация ВВ. В качестве факторов, влияющих на решение задачи, рассматриваются известные натурные суточные изменения скорости и направления ветра, изменение температуры и влажности воздуха, взаимодействие с атмосферой, влияние фотосинтеза, поступление взвесей из ДО, осаждение взвешенных частиц. Гидродинамические характеристики потока (компоненты скорости) рассчитываются с учетом термохалинных полей в водоеме, морфологии русла, изменения уровня свободной поверхности.

Уравнение баланса ВВ включает в себя его поступление при фотосинтезе фитопланктона и взмучивании ДО, горизонтальный перенос взвеси, ее оседание. Поступление и уменьшение содержания взвесей за счет взмучивания ДО, фотосинтеза, оседания взвеси определялось по статистическим функциональным зависимостям, полученным в результате обработки данных экспериментальных наблюдений.

Производство ОВ в верхнем слое водоема определялась с использованием полинома шестой степени относительно значения локальной температуры воды [12]. Изменение ее с глубиной учитывалось по величине прозрачности воды, рассчитываемой по со-

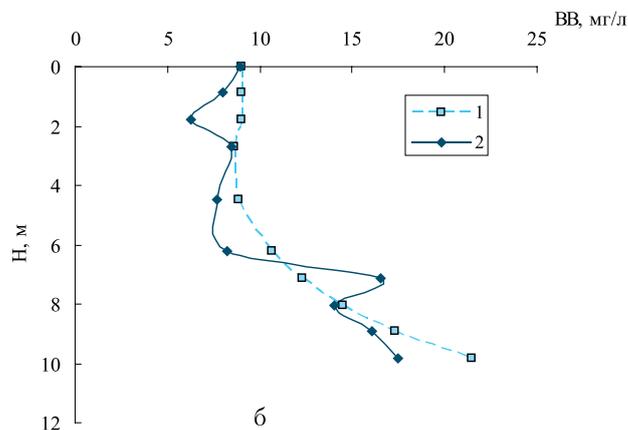
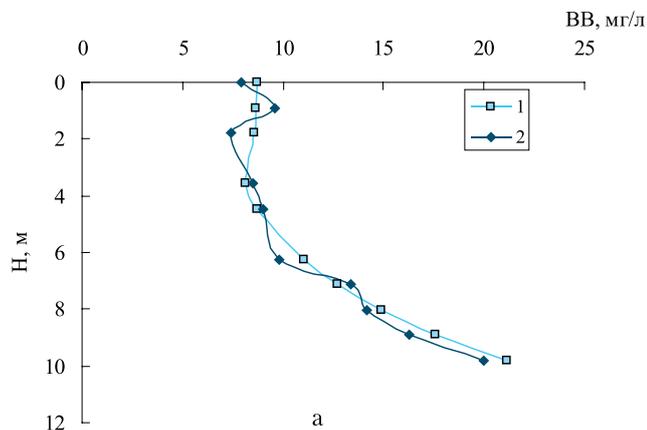


Рис. 5. Распределение измеренных (1) и рассчитанных (2) концентраций ВВ на вертикали Красновидово 28.06.09 (а) и 6.07.09 (б).

держанию ВВ в верхнем слое воды и глубине рассматриваемого горизонта.

Поступление взвесей с речным притоком рассчитывалось по зависимости концентрации ВВ от расхода притоков [13].

Двумерная постановка задачи не позволяет достоверно оценить изменения толщины перемешанного слоя, т.к. она изменяется преимущественно при сгонно-нагонных явлениях, поэтому для расчета взмучивания ДО использовалась ее зависимость от отношения скорости ветра к средней глубине плеса (рис. 4 а).

Для расчета вертикального профиля концентрации взмученного вещества были проведены расчеты отношения измеренных концентраций взвеси на вертикалях к средним по плесам, рассчитанным по зависимости $V_{Ввзм} = f(V_{ветра}, H_{ср})$. По всем имеющимся данным о вертикальном распределении ВВ была получена функция распределения отношения $V_{Ввзм} / V_{Ввзм}$ от относительной удаленности рассматриваемого горизонта H от дна (рис. 4 б).

Интенсивность СП для каждого слоя рассчитывалась по его зависимости от содержания ВВ. Апробирование программного комплекса осуществлялось на 30-ти километровом (по длине затопленной русловой ложбины) участке Можайского водохранилища (от створа Поздняково до плотины).

Расчет по модели проводился для периода 5.06.09 — 6.07.09. На рис. 5 приведены измеренные и рассчитанные концентрации ВВ на вертикалях. Отклонения рассчитанных и измеренных значений могут быть вызваны внутриводоевой циркуляцией воды,

которую невозможно учесть в двумерной постановке модели.

В качестве критерия достоверности расчетов был определен использующийся в гидрологических расчетах показатель S/σ — отношение среднеквадратической погрешности S к стандартному среднеквадратическому отклонению σ ряда наблюдений [14]. Критерий $S/\sigma = 0,62$, что свидетельствует об удовлетворительном качестве расчета.

Заключение

Таким образом, в формировании режима взвесей в летний период важную роль играет взмучивание ДО, вклад которого в среднем районе водохранилища превышает вклад первичной продукции фитопланктона;

Расчеты краткосрочных ориентировочных балансов ВВ позволили оценить интенсивность взмучивания ДО при разных синоптических условиях. Корреляционный анализ показал, что величина взмучивания ДО прямо пропорциональна скорости ветра и толщине перемешанного слоя воды и обратно связана со средней глубиной исследуемого района и стратифицированностью водной толщи.

Вклад валовой первичной продукции фитопланктона в баланс ВВ увеличивается с ростом стратифицированности водной толщи.

На основе полученных статистических зависимостей предложена двумерная модель формирования режима ВВ. Предложенная модель формирования режима ВВ, включа-

ющая в себя поступление взвесей в водную толщу при взмучивании ДО, образование автохтонного ВВ в результате фотосинтеза фитопланктона, поступление аллохтонной взвеси с притоком и уменьшение концентрации ВВ в результате осаждения вещества, дает удовлетворительное качество расчета. Расхождения измеренных и рассчитанных концентраций взвесей во многом объясняется внутриводной циркуляцией воды, учесть которую в двумерной постановке модели невозможно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (соглашение №8342)

Литература

1. Хатчинсон Д. Лимнология. М.: Прогресс, 1969. 593 с.
2. CE-QUAL-R1. A numerical, one-dimensional model of reservoir water quality. User's manual. Report E-82-1. US Army Corps of Engineers. Waterways Experimental Station, CE, Vicksburg, Miss. 1982.
3. Невская губа / Под ред. В.В. Меншуткина. СПб.: Наука, 1997. 375 с.

Ключевые слова:
взвеси,
взмучивание
донных
отложений,
седиментация,
моделирование

4. Буторин Н.В. Донные отложения верхне-волжских водохранилищ / Н.В. Буторин, Н.А. Зиминова, В.П. Курдин. Л.: Наука. 158 с.
5. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
6. Дубовская О.П. Методологические основы использования седиментационных ловушек в морских и континентальных водоемах (обзор) // Гидробиол. журн., 2002. Т. 38. № 5. С. 98–110.
7. Леонов А.В. Органическое вещество в воде Можайского водохранилища: оценка его трансформации по кинетическим параметрам БПК / А.В. Леонов, Л.Б. Бердавцева // Водные ресурсы. 1990. № 3. С. 63–80.
8. Мартынова М.В. Влияние взмучивания донных отложений на экосистемы водоемов // География и природные ресурсы, 2007. Т. 4. С. 38–41.
9. Periañez R. Modelling the suspended matter dynamics in a marine environment using a three dimensional s



E.R. Kremenetskaya, V.M. Perekal'skii, D.V. Lomova

ROLE OF BOTTOM SEDIMENT DETACHMENT IN SUMMER BALANCE OF SUSPENDED MATTER IN THE MOZHAISKOE RESERVOIR

Intensity and role of bottom sediment detachment in summer balance of suspended matter under different meteorological conditions were identified based on field data. Statistical dependences of sedimentation intensity on content of suspended matter, part of organic matter and water stratification were obtained. Model of suspended matter regime was proposed.

Key words: suspended matter, bottom sediment detachment, sedimentation, modeling