

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

Географический факультет



На правах рукописи

УДК 556.114.7:556.55

СОКОЛОВ Дмитрий Игоревич

**ВЛИЯНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ
НА ИЗМЕНЕНИЕ ОКИСЛЯЕМОСТИ И ЦВЕТНОСТИ РЕЧНОЙ ВОДЫ
(НА ПРИМЕРЕ ИСТОЧНИКОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ Г. МОСКВЫ)**

25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук**

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: **ЭДЕЛЬШТЕЙН Константин Константинович**
доктор географических наук, профессор
кафедры гидрологии суши

Официальные оппоненты: **САПОЖНИКОВ Виктор Вольфович**
доктор географических наук, профессор,
академик РАН, главный научный сотрудник
ФГУП ВНИИ рыбного хозяйства и океанографии
(г. Москва)

ВИНОГРАДОВА Надежда Николаевна
кандидат географических наук,
старший научный сотрудник
НИЛ эрозии почв и русловых процессов МГУ

Ведущая организация: **Институт биологии внутренних вод**
имени И.Д. Папанина
Российской академии наук (г. Борок)

Защита состоится **12 декабря 2013 г. в 17 часов** на заседании диссертационного совета Д 501.001.68 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, ауд. 18-01 (тел. +7 495 9391420, факс +7 495 9328836, e-mail: science@geogr.msu.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Фундаментальной научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: Ломоносовский проспект, д. 27, А-8. Автореферат размещен на сайте географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (<http://www.geogr.msu.ru>). Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, направлять в адрес совета.

Автореферат разослан **8 ноября 2013 г.**

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор



Савенко В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Водохранилищам принадлежит важная роль не только в регулировании водного стока в целях его оптимального использования в народном хозяйстве, но и в изменении качества вод. В связи с этим выяснение закономерностей формирования химического состава зарегулированного речного стока имеет большое значение.

Один из наиболее значимых показателей качества воды – содержание в ней органических веществ (ОВ). Количественные характеристики их содержания – цветность и окисляемость воды – строго нормируются для источников питьевого водоснабжения. Снижение в водозаборах этих показателей до нормативных значений сопряжено с большими трудностями и затратами.

Более чем для трети поверхностных источников водоснабжения России характерно высокое содержание ОВ, достигающее 3 ПДК и более. Высокая цветность и окисляемость речной воды – основной недостаток верхневолжских водохранилищ и главная проблема Волжского источника водоснабжения г. Москвы. Превышение нормативов по окисляемости в отдельные периоды характерно и для Москворецкой гидротехнической системы водоснабжения столичного региона.

В этих условиях важным фактором, способным снижать нагрузки на станции водоподготовки и улучшать качество питьевой воды, является самоочищающая способность водных масс водохранилищ, благодаря которой происходит изменение состава поступающих в них речных вод и снижение в них цветности и окисляемости.

Степень разработанности темы исследования. Первые попытки изучения содержания природных ОВ в водных объектах суши относятся к XIX в. Большой шаг вперед в этом направлении был сделан в первом десятилетии XX в. Обзор этих и последующих работ выполнен Б.А. Скопинцевым, А.Д. Семеновым, Д. Хатчинсоном, В.Ф. Рощупко, Х. Секи и др.

Значительный вклад в исследования особенностей режима цветности и окисляемости, процессов внутриводоемной трансформации ОВ в озерах и водохранилищах принадлежит М.А. Фортунатову, А.В. Францеву, С.И. Кузнецову, В.И. Романенко, А.В. Леонову, Л.Б. Бердавцевой, Э.С. и Е.М. Бикбулатовым, А.С. Литвинову и др.

И все же процессы снижения показателей содержания аллохтонных ОВ в условиях замедления водообмена в водохранилищах изучены еще явно недостаточно. В специальной литературе можно встретить описание экспериментов в этой области, однако эти эксперименты часто сосредоточены на каком-либо одном специфическом процессе (например, фотохимическом обесцвечивании) или же носят качественный характер.

Цели и задачи исследования. Цель работы – количественно оценить самоочищающую способность экосистем водохранилищ с различной проточностью в отношении аллохтонных веществ, приносимых реками и определяющих окисляемость и цветность воды, а также вклад внутриводоемных процессов в изменение этих показателей качества воды.

Для достижения этой цели решены следующие **задачи**:

- на основе анализа литературных данных выявлены специфические особенности самоочищения водных масс в озерах и водохранилищах от аллохтонных веществ, и из 14 водохранилищ системы водоснабжения г. Москвы выбраны три разнотипных объекта исследования: Можайское, Иваньковское и Учинское;

- выполнены детальные полевые балансовые исследования гидролого-гидрохимического режима Можайского водохранилища в течение годового цикла при различных метеоусловиях, рассмотрены особенности гидролого-гидрохимического режима двух других водохранилищ;

- произведены балансовые расчеты изменения окисляемости и цветности воды в отдельные фазы гидрологического режима Можайского водохранилища и серия расчетов их внешних балансов в трех водохранилищах в годы, различные по типу регулирования стока;

- организованы и проведены многолетние исследования изменения скорости седиментации взвешенных веществ и их органической компоненты на морфологически различных участках Можайского водохранилища при различных погодных условиях;

- выполнен цикл полевых наблюдений за пространственно-временной изменчивостью процессов, влияющих на изменение окисляемости и цветности основной водной массы в репрезентативном участке Можайского водохранилища и во всем водоеме;

- на основе балансовых расчетов сопоставлен вклад внутриводоемных процессов в изменение окисляемости воды в репрезентативном участке Можайского водохранилища.

Объект и предмет исследования. Объектами исследования выбраны три водохранилища – крупное Ивановское, осуществляющее сезонное регулирование стока р. Волги; малое Учинское в составе канала имени Москвы – отстойное, из которого вода забирается на Северную и Восточную водопроводные станции; среднего размера Можайское в верховье р. Москвы, многолетнего регулирования речного стока.

Предметом исследования является количественная оценка внутригодовых и межгодовых изменений окисляемости и цветности речной воды в водохранилищах разного вида регулирования стока под влиянием внутриводоемных гидрологических процессов.

Материалы и методы исследования. В числе информационных источников диссертации использованы:

- архивные материалы 40-летних исследований Красновидовской лаборатории по изучению водохранилищ (ныне Красновидовская учебно-научная база), публикации сотрудников ИБВВ и ИВП РАН, кафедры гидрологии суши МГУ и другие научные источники;

- нормативные документы, методические пособия и руководства, регламентирующие методики определения исследуемых показателей и их допустимые значения в водах коммунально-питьевого водоснабжения;

- материалы детальных полевых наблюдений на Можайском водохранилище и его водосборе, включавших определение окисляемости и цветности воды, в течение годовых циклов 1968/69 г., 1983/84 г. и (по инициативе и с участием автора) в 2012/13 г.;

- материалы многолетних регулярных систематических наблюдений системы мониторинга качества воды Волжского источника водоснабжения г. Москвы, включающих определение окисляемости и цветности воды;

- материалы проведенных в 2007–2011 гг. с участием автора полевых экспериментов по изучению скорости седиментационных потоков и продукционно-деструкционных процессов в Можайском водохранилище.

Методологическую основу при выполнении работы наряду с режимными, балансовыми и экспериментальными полевыми наблюдениями составили:

- традиционные химико-аналитические методы лабораторного исследования состава воды;

- использование принципа вещественных балансов, часто применяемого в гидролого-гидрохимических исследованиях для оценки влияния водохранилищ на сток веществ и формирование качества воды.

- метод географической аналогии и др.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

- впервые количественная оценка влияния водохранилищ на изменение окисляемости и цветности речной воды выполнена с использованием единой методики балансовых расчетов на основе обширных фактических материалов многолетних гидрологических и гидрохимических наблюдений;

- уточнены основные закономерности снижения окисляемости и цветности в Можайском водохранилище, выявленные по результатам балансовых наблюдений 1968/69 гг. (Можайское водохранилище, 1979), на основе более детальных и более современных материалов исследований: благодаря впервые произведенному анализу материалов балансовых наблюдений 1983/84 гг. и осуществленным впервые за последние 30 лет и в третий раз за время существования водохранилища наблюдениям 2012/13 г.;

- в результате прямых (in situ) многолетних наблюдений за процессом седиментации – одним из основных факторов убыли цветности и окисляемости в водохранилищах – выявлены зависимости этого процесса от гидрологических и метеорологических условий;

- оценен вклад процессов седиментации и деструкции ОВ в изменение окисляемости воды путем полевых специально спланированных наблюдений на Можайском гидрологическом полигоне.

Основные защищаемые положения:

1. В водохранилищах под действием внутриводоемных процессов происходит снижение цветности и окисляемости воды, обратно пропорциональное интенсивности водообмена водохранилищ. В наибольшей степени самоочищающая способность водохранилищ проявляется в отношении цветности, в наименьшей – в отношении бихроматной окисляемости.

2. В водохранилищах сглаживается внутригодовая изменчивость окисляемости и цветности, причем в большей степени, чем колебания водного стока. Это сглаживание тем существеннее, чем замедленнее водообмен водохранилищ.

3. Статистически значимые зависимости скорости седиментационных потоков от гидрологических и метеорологических факторов, выявленные при анализе закономерностей процесса седиментации взвесей.

4. Основная доля в балансе ОВ в летний период в водохранилищах принадлежит транзиту ОВ. В приходную часть баланса вносят сопоставимый вклад валовая продукция и взмучивание ОВ из донных отложений, в расходную – седиментация и деструкция ОВ в водной толще.

Достоверность и обоснованность результатов работы. В работе использованы полные и достоверные фактические материалы многолетних гидрологических и гидрохимических наблюдений. Полевые работы, лабораторные анализы и балансовые расчеты проводились по традиционным и официально рекомендуемым методикам. Установлена статистически значимая связь между окисляемостью, цветностью воды и содержанием в ней $C_{орг}$,

концентрация которого в пробах воды определялась в гидрохимической лаборатории ВНИРО. Балансовые оценки снижения окисляемости и цветности в Можайском водохранилище, полученные при анализе материалов 1983/84 и 2012/13 г.г., хорошо согласуются с результатами наблюдений 1968/69 г.

Практическая значимость работы. При очистке природных вод с высоким содержанием аллохтонных ОВ у водопроводных станций возникают существенные проблемы как технологического, так и финансового характера (заготовление коагулянта в необходимых количествах, его транспортировка, хранение и утилизация; в процессе коагуляционной очистки – увеличение концентрации остаточного алюминия, при хлорировании – образование токсичных хлорорганических соединений, и т.д.).

В то же время результаты данной работы однозначно подтверждают, что водохранилища могут выступать в качестве эффективных звеньев технологической цепи очистки питьевой воды, улучшая качество воды в результате действия природных процессов самоочищения.

Результаты работы могут быть использованы при разработке предложений по управлению качеством воды для ОАО «Мосводоканал», ФГУП «Канал имени Москвы», ФГУП РосНИИВХ, Московско-Окского БВУ и других структурных подразделений Федерального агентства водных ресурсов, поскольку указывают на то, что, управляя гидрологическим режимом водохранилищ (их водообменом, уровнем, характером и степенью регулирования речного стока), можно влиять на самоочищающую способность водных масс водохранилищ и качество воды, снижая тем самым цветность и окисляемость воды до 40% и более по сравнению с исходной речной водой.

Апробация результатов исследования. Отдельные результаты исследований, проведенных в ходе работы над диссертацией, докладывались, обсуждались и опубликованы в трудах следующих конгрессов, конференций и семинаров: Международная научно-практическая конференция «Эколого-гидрологические проблемы изучения и использования водных ресурсов» (Казань, 2006); XIV и XV Международные конференции студентов, аспирантов

и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2007, 2008); I, III и IV Международные научно-практические конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2007, 2011, 2013); Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Шевченковская весна» (Киев, 2007); Международный Конгресс «Вода: экология и технология (ЭКВАТЭК)» (Москва, 2008); Вторая научная конференция молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» (Москва, 2008); V Всероссийский симпозиум с международным участием «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах» (Петрозаводск, 2012); Всероссийская конференция «Бассейн Волги в XXI-м веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ» (Борок, 2012).

По теме диссертации имеется 16 публикаций, в том числе три статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и приложений. Общий объем диссертации 179 страниц, основной текст изложен на 142 страницах и содержит 11 таблиц и 26 рисунков. Список литературы включает 143 наименования, в том числе 24 на иностранных языках.

Автор выражает благодарность заведующему Красновидовской УНБ к.г.н., с.н.с. В.В. Пуклакову и к.г.н., в.н.с. кафедры гидрологии суши МГУ Ю.С. Даценко за всестороннее содействие в организации и проведении полевых работ, ценные консультации и предоставленные данные, сотрудникам ИВП РАН к.г.н., н.с. Е.Р. Кременецкой и к.г.н., н.с. Д.В. Ломовой за плодотворное многолетнее сотрудничество в исследованиях процессов седиментации, сотрудникам Красновидовской УНБ к.б.н., с.н.с. С.Л. Беловой, инж. О.Н. Ериной и технику В.В. Кочневой за участие в балансовых наблюдениях 2012/13 г., сотрудникам ВНИРО зав. лаб., к.г.н. Н.М. Лапиной, в.н.с., к.б.н. А.И. Агатовой, с.н.с., к.г.н. С.А. Лапину за предоставленные результаты лабораторного анализа воды для статистических расчетов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, охарактеризована ее научная новизна и практическая значимость, даны сведения о методике и исходных материалах, использованных в работе, сформулирован предмет защиты.

В **главе 1 «Окисляемость и цветность природных вод как показатели содержания органических веществ»** приведены общие сведения об ОВ природных вод суши, описаны методы косвенного определения содержания в воде ОВ, перечислены показатели содержания ОВ, включая цветность (ЦВ), перманганатную (ПО) и бихроматную (БО) окисляемость воды.

По современным представлениям ЦВ определяется наличием окрашенных гумусовых веществ аллохтонного происхождения. Величина ПО в первую очередь характеризует содержание аллохтонных ОВ, так как гуминовые и фульвокислоты окисляются методом ПО наиболее полно, а свежееобразованное автохтонное ОВ – слабо. Метод БО дает практически полное (на 95% и более) окисление ОВ.

Рассмотрено влияние высокого содержания ОВ на качество воды, факторы снижения содержания ОВ в природных водах (среди которых для аллохтонных ОВ одним из наиболее существенных является процесс седиментации), подходы к количественной оценке самоочищающей способности водных экосистем в отношении аллохтонных ОВ. Приведен краткий обзор исследований по оценке удерживающей способности водохранилищ в отношении ОВ. Показано, насколько могут различаться такие оценки, полученные на основе одних и тех же исходных данных, в зависимости от методики расчета. Очевидно, что наиболее достоверная оценка изменения окисляемости и цветности речной воды в водоеме возможна, если применить принцип вещественных балансов, весьма трудоемкий из-за необходимости тщательного расчета всех составляющих вещественного баланса экосистемы водоема. Этого можно достигнуть лишь учащенными в пространстве и времени комплексными наблюдениями в течение всего гидрологического цикла.

В главе 2 «Объекты и материалы исследования» дано обоснование выбора трех объектов исследования из 14 водохранилищ системы водообеспечения Москвы. Выбранные водохранилища различны по регулированию речного стока, гидрологическому режиму и интенсивности водообмена. Можайское водохранилище, относящееся к Москворецкому источнику водоснабжения, крупнейшее в Московской области, характеризуется наименьшей проточностью из трех рассматриваемых водохранилищ (годовой коэффициент водообмена $K_B = 1,2\text{--}2,4 \text{ год}^{-1}$). Иваньковское водохранилище в верховьях р. Волги, служащее основным источником водоснабжения г. Москвы, отличается интенсивным водообменом (K_B в многоводные годы достигает 13 год^{-1} и более). Учинское водохранилище, относящееся к системе канала им. Москвы, – отстойный водоем, питающийся зарегулированным стоком. Из него осуществляется водозабор Северной и Восточной станциями водоподготовки. Его годовой водообмен после ввода в эксплуатацию Северной станции изменяется в диапазоне $K_B = 5\text{--}9 \text{ год}^{-1}$.

Исследуемые водохранилища обеспечены максимально подробными и достоверными данными наблюдений за составляющими как водного, так и вещественного баланса в течение всего годового цикла. Наиболее полные полевые наблюдения, включающие определение БО, ПО, ЦВ, выполнены на Можайском водохранилище и его водосборе по программам «Балансовый год» в 1968/69 году (объем годового притока $\Sigma ПР = 257 \text{ млн. м}^3$, $K_B = 1,7 \text{ год}^{-1}$) и в 1983/84 году ($\Sigma ПР = 263 \text{ млн. м}^3$, $K_B = 1,4 \text{ год}^{-1}$). Для изучения современного состояния экосистемы Можайского водохранилища и количественной оценки влияния водоема на сток аллохтонных ОВ, автором совместно с сотрудниками Красновидовской учебно-научной базы географического факультета МГУ (далее Красновидовская УНБ) организованы детальные наблюдения по программе «Балансовый год» в 2012/13 году ($\Sigma ПР = 360 \text{ млн. м}^3$, $K_B = 1,8 \text{ год}^{-1}$).

В 1983/84 г. проводили детальные (в среднем 2 раза в неделю) гидрохимические наблюдения на реках Москва, Лусьянка и Колочь, дающих более 83% притока воды в водохранилище, и в нижнем бьефе Можайского

гидроузла. Показатели ЦВ, ПО, БО в самом водоеме определяли во время ежемесячных гидролого-гидрохимических съемок (ГГХС) на 5–7 опорных станциях, равномерно распределенных по длине водоема, с шагом по глубине 2 м, а также методом сливных проб по равномерной сетке из 38–60 станций (1 станция на 0,5 км²). В 2012/13 г. наблюдения на притоках и в нижнем бьефе выполняли в среднем 1 раз в декаду (более 100 проб), ГГХС – по равномерной сетке русловых станций, расположенных в 19 морфоучастках водохранилища, на 2–5 горизонтах в зависимости от характера стратификации водной толщи (9 съемок, 168 станций, более 500 проб).

Анализ режима окисляемости и цветности воды в Иваньковском и Учинском водохранилище основан на данных регулярных систематических наблюдений за качеством воды в системе мониторинга Волжского источника водоснабжения Москвы. В работе использованы материалы наблюдений на притоках и сбросе Иваньковского водохранилища (за период с 1957 по 1988 год с частотой 2 раза в месяц) и Учинского водохранилища (с 1957 по 2008 год 1 раз в неделю).

В июне–августе 2011 г. сотрудниками кафедры гидрологии суши и Красновидовской УНБ с участием автора выполнен полевой эксперимент «Полигон–2011», включавший трехразовую в течение суток синхронную съемку Красновидовского плеса – репрезентативного участка водоема, расположенного в его центральной части – с учащенными наблюдениями, позволившими изучить характер внутрисуточной и пространственной изменчивости окисляемости воды в пределах плеса.

Поскольку одним из важнейших факторов снижения содержания аллохтонных ОВ являются процессы седиментации органических частиц, в 2007–2011 гг. на Можайском водохранилище автор совместно с сотрудниками ИВП РАН проводил экспериментальные наблюдения за седиментационными потоками ОВ методом ловчих стаканов. Также осуществляли постановку продукционно-деструкционных станций, ГГХС, рейдовые гидролого-гидрохимические и метеорологические наблюдения.

В главе 3 «Режим окисляемости и цветности воды в исследуемых водохранилищах» описаны основные черты режима окисляемости и цветности воды в исследуемых водохранилищах. Проведенный анализ свидетельствует о существенных различиях в режиме показателей окисляемости и цветности рассматриваемых водохранилищ в зависимости от их проточности и особенностей регулирования.

Иваньковское и Можайское водохранилища, при схожих закономерностях внутригодовых изменений притока ОВ, но отличающихся почти на порядок значениях K_B , имеют разный внутригодовой ход показателей окисляемости и цветности воды, сбрасываемой в нижний бьеф гидроузлов. Главный источник аллохтонного ОВ для обоих водохранилищ – речные воды, для которых характерно максимальное содержание ОВ в периоды повышенного стока, поэтому основное поступление вод с повышенной окисляемостью и цветностью в оба водоема происходит в половодье (30–50%) и паводки. В Иваньковском водохранилище водные массы быстрее достигают нижнего бьефа за счет более интенсивного водообмена, подвергаясь при этом меньшей трансформации, вследствие чего колебания стока ОВ из водохранилища повторяют колебания притока с некоторым отставанием и в более сглаженной форме. В Можайском водохранилище, отличающемся замедленным водообменом, речные водные массы находятся дольше, сильнее трансформируются и позже достигают приплотинного плеса, поэтому до 70% стока вод с повышенной окисляемостью и цветностью из водоема приходится на холодный осенне-зимний период, что неблагоприятно для их обработки на Рублевской водопроводной станции.

Учинское водохранилище заполняется водой водохранилищ водораздельного бьефа канала им. Москвы. Состав водных масс, поступающих из Иваньковского в Учинское водохранилище, успевает значительно измениться по мере прохождения водоемов канала; режим работы гидротехнических сооружений канала нарушает сезонные закономерности поступления вод того или иного генезиса и состава. Основной приток в

Учинское водохранилище веществ, определяющих окисляемость и цветность воды, тоже происходит в апреле–мае, однако он обусловлен поступлением больших объемов воды из приплотинного плеса Иваньковского водохранилища в фазу наполнения водораздельного бьефа системы, при этом окисляемость и цветность в водных массах, наполняющих водоем, невелики. В течение лета, напротив, в водоем поступают воды из Пестовского водохранилища с максимальными значениями окисляемости и цветности, в то время как для речных вод в летнюю межень характерны низкие значения ПО и ЦВ.

По данным полевого эксперимента «Полигон–2011» выявлены следующие особенности внутрисуточной и пространственной изменчивости окисляемости воды в пределах отдельного плеса водохранилища. Внутрисуточная изменчивость окисляемости больше, чем пространственная. Пространственная неоднородность свойств воды может существенно увеличиваться с глубиной вследствие таких явлений, как прибрежный апвеллинг в отдельной части плеса. Максимальные значения ПО отмечены у поверхности (за счет смыва с водосбора и транзита аллохтонных веществ над слоем плотностного скачка) и в русловой ложбине (за счет процессов седиментации и разложения нестойких ОВ до биохимически стойких). Максимальные значения БО наблюдались в эпилимнионе (особенно в поверхностном слое) при благоприятных условиях для продуцирования автохтонного ОВ. Соотношение ПО/БО снижалось в течение дня по мере продуцирования свежего ОВ и росло ночью в результате его деструкции.

В главе 4 «Балансовые оценки изменения в водохранилищах окисляемости и цветности речных вод» приводятся результаты расчета ориентировочных балансов ОВ по показателям БО, ПО, ЦВ для исследуемых водохранилищ в годы и периоды разной водности. Достоверность расчетов (как и точность определений БО, ПО, ЦВ, выполненных автором и сотрудниками химической лаборатории Красновидовской УНБ) подтверждается тесной связью между этими показателями содержания ОВ и содержанием в воде $S_{орг}$, полученной по данным наблюдений на Можайском водохранилище в 2012 г.

Для Иваньковского и Учинского водохранилищ при отсутствии данных об изменениях запасов ОВ в самих водоемах возможно составление лишь многолетних внешних балансов:

$$\pm\Delta\text{ОВ} = \text{ОВ}_{\Pi} - \text{ОВ}_{\text{Р}},$$

где $\pm\Delta\text{ОВ}$ – изменение в водохранилище запаса веществ, определяющих окисляемость и цветность воды, ОВ_{Π} и $\text{ОВ}_{\text{Р}}$ – количество этих веществ, соответственно поступающее в водоем с притоком и удаляющееся из него со стоком воды за тот или иной расчетный период.

Для Можайского водохранилища объем данных позволяет оценить меняющийся вклад внутриводоемных процессов ($\pm\text{ОВ}_{\text{ВВ}}$) в режим показателей БО, ПО, ЦВ в течение года:

$$\pm\Delta\text{ОВ} = \text{ОВ}_{\text{КОН}} - \text{ОВ}_{\text{НАЧ}} = \text{ОВ}_{\Pi} - \text{ОВ}_{\text{Р}} \pm \text{ОВ}_{\text{ВВ}},$$

где $\text{ОВ}_{\text{НАЧ}}$ и $\text{ОВ}_{\text{КОН}}$ – запасы в водохранилище веществ, определяющих окисляемость и цветность воды, в начале и конце расчетного периода; $\pm\text{ОВ}_{\text{ВВ}}$ – изменение запаса этих веществ за счет внутриводоемных процессов.

Для ПО и ЦВ характерно снижение под действием внутриводоемных процессов в течение года (рисунок 1). Максимально этот эффект проявляется в начале лета и в начале осени (преобладающим фактором, вероятнее всего, становится сорбция аллохтонных ОВ на почвенных взвесах, которыми богаты мутные воды половодья и паводков, и последующая седиментация в условиях замедлившегося водообмена). Исключение для ЦВ составляет период летней аноксии, когда заметное увеличение ЦВ в придонных горизонтах в отсутствие притока высокоцветных вод связано, скорее всего, с восстановлением железа и марганца из донных отложений. Для ПО исключением являются периоды, следующие за интенсивным «цветением» водоема, когда рост значений ПО под влиянием внутриводоемных процессов можно объяснить разложением части лабильного ОВ до трудноокисляемых форм.

Как видно из рисунка 1, БО как показатель суммарного содержания ОВ, включая автохтонное, отличается более сложным режимом с точки зрения внутриводоемной трансформации. Особенно отчетливо это заметно на примере

1984 г., когда съемка водохранилища в мае была выполнена в момент «цветения» диатомовых водорослей (общая биомасса достигала 2,5 мг/л), в июне – в фазу «чистой воды», а в июле – во время интенсивного «цветения» пиропитовых водорослей (их общая биомасса превышала 20 мг/л). Чередование периодов активного продуцирования биотой свежего ОВ и последующей деструкции водорослей, осаждения детрита и соосаждения со взвесью части растворенных в воде продуктов его бактериального разложения обусловило значительный размах колебаний вклада внутриводоемных процессов в баланс ОВ (по БО), из чего можно сделать вывод о сопоставимости роли транзита и продукционно-деструкционных процессов в балансе суммарного содержания ОВ в вегетационный период.

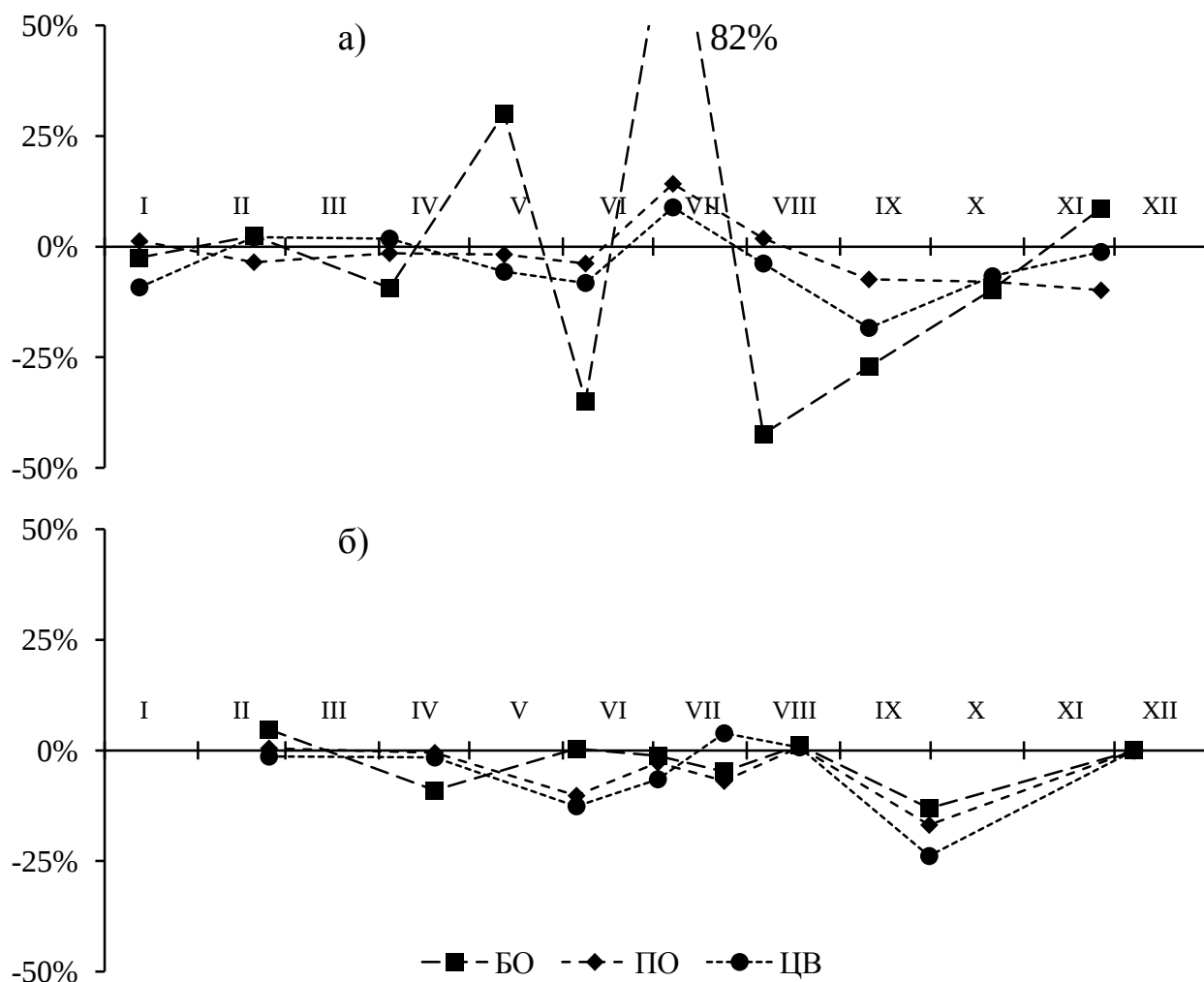


Рисунок 1. Вклад внутриводоемных процессов (в процентах от $ОВ_{П}$) в изменение БО, ПО, ЦВ в Можайском водохранилище в 1983/84 г. (а) и 2012/13 г. (б)

При прохождении речными водами Можайского водохранилища в них уменьшалась доля трудноокисляемого биохимически ОВ (аллохтонного) и росла доля легкоокисляемых фракций. Среднегодовое соотношение ПО/БО снизилось в 1983/84 г. от 0,45 в речных водах на входе в водохранилище до 0,39 в нижнем бьефе гидроузла, в 2012/13 г. – от 0,51 до 0,43.

Результаты расчетов внешних балансов (таблица 1) позволяют судить о влиянии проточности водохранилищ на их самоочищающую способность в отношении повышенной окисляемости и цветности. Расчетный период для Иваньковского водохранилища поделен на три интервала с разной водностью, для Учинского водохранилища данные приведены за весь период и за десятилетия с минимальным и максимальным водообменом. Для Можайского водохранилища результаты приведены для трех балансовых лет (для 1968/69 г. – по литературным данным). Как видно из таблицы 1, самоочищающая способность экосистем водохранилищ обратно пропорциональна интенсивности водообмена (рисунок 2). Полученные зависимости снижения ПО и ЦВ от $\ln(K_B)$ характеризуются значимыми коэффициентами корреляции ($r = 0,88$ и $r = 0,99$ при длине ряда $n = 9$).

Таблица 1. Снижение БО, ПО, ЦВ в водохранилищах с разным водообменом

Водохранилище	Период	$K_B, \text{год}^{-1}$	Снижение			
			ЦВ		ПО (БО)	
			град Pt–Co	% от притока	мг О/л	% от притока
Можайское	1969	1,7	20	40%	–	41% (38%)
	1984	1,4	20	43%	2,4 (3,2)	27% (17%)
	2012	1,8	20	41%	4,5 (6,0)	39% (28%)
Учинское	1957–1966	4,8	15	26%	1,2	14%
	1957–2008	6,8	10	20%	1,1	10%
	1987–1996	8,5	8	18%	0,8	9%
Иваньковское	1963–1976	8,3	16	21%	2,3	20%
	1976–1988	10,9	15	17%	1,4	12%
	1958–1963	12,3	12	11%	0,8	5%

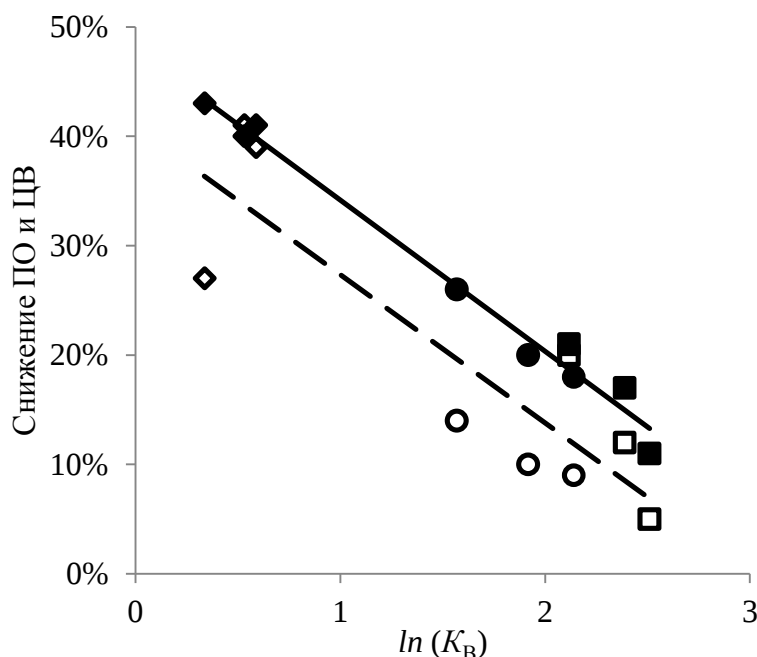


Рисунок 2. Зависимость снижения ПО (незакрашенные точки, пунтир) и ЦВ (закрашенные точки, сплошная линия) от коэффициента водообмена K_B в Можайском (ромбы), Иваньковском (квадраты) и Учинском (круги) водохранилищах

Максимально самоочищение водных масс водохранилища проявляется в обесцвечивании воды. Примечательно, что оценки снижения ЦВ в Можайском водохранилище для трех балансовых лет практически совпадают, несмотря на значительно менявшийся в течение почти полувека характер хозяйственного использования территории водосбора водохранилища. Наиболее различаются балансовые годы по снижению показателя БО.

В Можайском водохранилище снижение БО обратно пропорционально средней за вегетационный период общей биомассе фитопланктона, приблизительно оцененной по имеющимся данным наблюдений (в 1983/84 г. она была в 1,5 раза больше, чем в два других года). С ростом интенсивности продукционно-деструкционных процессов в балансе ОВ снижается доля аллохтонного ОВ (в том числе окрашенного) и увеличивается доля автохтонного ОВ, подавляющая часть которого разрушается в сравнительно короткие промежутки времени, однако оставшаяся часть влияет на результирующую баланса, уменьшая величину снижения БО.

Для оценки влияния водохранилищ на внутригодовую изменчивость цветности и окисляемости речных вод рассчитаны коэффициенты вариации C_V для временных рядов показателей БО, ПО, ЦВ в речных водах (на «входе» в водохранилища) и в водах, сбрасываемых (забираемых) из водохранилищ (на «выходе»). Полученные значения C_V сопоставлены между собой, а также со

значениями C_v , рассчитанными для рядов расходов воды. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что водохранилища сглаживают характер внутригодовых колебаний не только водного стока, но и стока ОВ, что особенно важно с точки зрения технологий водоподготовки. При этом колебания окисляемости и цветности, характеризующиеся высокой изменчивостью в речных водах, сглаживаются вдвое значительно по сравнению с колебаниями расходов воды. Заметнее всего снижаются значения C_v для ЦВ и ПО, изменчивость величины БО сильно зависит от внутриводоемных процессов продуцирования и деструкции автохтонного ОВ.

Глава 5 «Влияние седиментации на удержание органических веществ в водохранилище». Данные наблюдений за седиментацией ОВ – одним из основных факторов убыли аллохтонного ОВ в водохранилище – позволяют выявить ряд закономерностей этого процесса и указывают на наличие связей между скоростью седиментационных потоков (СП) и некоторыми гидрологическими и метеорологическими факторами (рисунок 3).

На величину СП в придонных горизонтах существенно влияет режим уровня в водохранилище (рисунок 3, а): при большей сработке ветровое перемешивание чаще приводит к взмучиванию донных отложений, менее устойчива летняя стратификация, и большее количество взвесей достигает дна.

Величина седиментационного потока ОВ в составе взвесей ($СП_{ОВ}$) прямо пропорциональна активности ветрового перемешивания (коэффициент корреляции величин $СП_{ОВ}$ и скорости ветра составил 0,92 при $n = 8$ по данным за 2009 г.), что связано с взмучиванием донных отложений (рисунок 3, б).

На осаждение, разложение и минерализацию ОВ также существенно влияет устойчивая температурная стратификация: часть ОВ задерживается термоклином и окисляется, не достигнув дна; таким образом, величина СП в придонных горизонтах русловых станций обратно пропорциональна максимальному вертикальному градиенту температуры воды. Корреляционные соотношения соответствующих экспоненциальных зависимостей для русловых станций составили $r^2 = 0,90$ для суммарного СП (рисунок 3, в) и $r^2 = 0,71$ для

СП_{ОВ} при $n = 7$ (рисунок 3, г). На мелководных станциях, перемешанных до дна, напротив, может наблюдаться прямая зависимость, так как при прогреве водной толщи создаются оптимальные условия для развития планктона, а уменьшение плотности воды способствует седиментации детрита.

При этом доля ОВ в потоках взвесей снижается с глубиной по мере его минерализации. Поэтому в придонных горизонтах русловых станций отмечается обратная связь между относительным содержанием ОВ в осадке ловушки и величиной максимального температурного градиента, а на пойменных и мелководных станциях – положительная. Таким образом, максимальные СП и СП_{ОВ} наблюдались на русловых станциях в периоды циклональной погоды (при похолодании и усилении ветра).

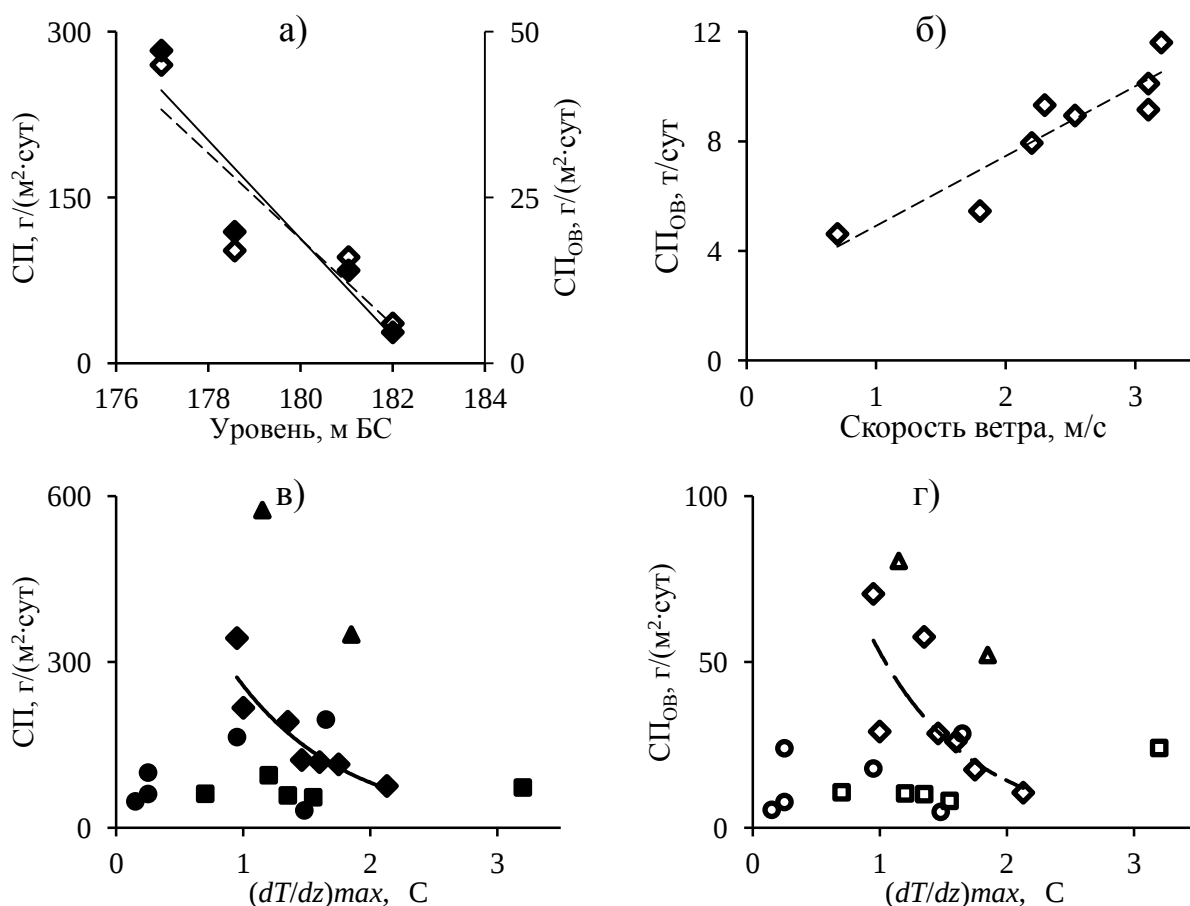


Рисунок 3. Зависимости скоростей СП (закрашенные точки, сплошная линия) и СП_{ОВ} (незакрашенные точки, пунктир) от среднего уровня воды в Можайском водохранилище в летние периоды 2008–2011 гг. (а), скорости СП_{ОВ} от скорости ветра в 2009 г. (б), скорости СП (в) и СП_{ОВ} (г) от максимального за срок экспозиции вертикального температурного градиента $(dT/dz)_{max}$ на русловой станции (ромбы, во время паводков – треугольники), пойменной (квадраты) и мелководной (круги) станциях Красновидовского плеса в 2008 г.

Материалы наблюдений, организованных на Можайском водохранилище в 2009 г., позволяют рассчитать ориентировочный баланс суммарного содержания ОВ за летний период для Красновидовского плеса:

$$\pm \Delta \text{ОВ} = \text{ОВ}_{\text{кон}} - \text{ОВ}_{\text{нач}} = \text{ОВ}_{\text{П}} + \text{ОВ}_{\text{БОК}} - \text{ОВ}_{\text{Р}} + \text{П} - \text{Д} + \text{ВЗМ} - \text{СЕД},$$

где $\text{ОВ}_{\text{нач}}$ и $\text{ОВ}_{\text{кон}}$ – начальный и конечный запасы ОВ в воде плеса, $\text{ОВ}_{\text{П}}$ и $\text{ОВ}_{\text{БОК}}$ – поступление ОВ из вышележащих районов водохранилища и с боковым притоком, $\text{ОВ}_{\text{Р}}$ – сток ОВ в нижележащую часть водоема, П – валовая продукция планктона, Д – деструкция ОВ в толще воды и донных отложениях, СЕД – седиментация ОВ, ВЗМ – взмучивание ОВ донных отложений.

По данным наблюдений на плесе в летний период 2009 г., основную долю (в среднем 60%) в балансе ОВ составили приток $\text{ОВ}_{\text{П}}$ и сток $\text{ОВ}_{\text{Р}}$ (рисунок 4). Доля продукции П в приходной части баланса составляла от 3 до 22% (в среднем 14%), увеличиваясь в период усиления стратификации водной толщи. Вклад взмучивания донных отложений ВЗМ изменялся от 5 до 20%, лишь в конце лета в период массового отмирания синезеленых водорослей при высокой ветровой активности и снижении притока он превышал 40%, доля поступления ОВ с боковым притоком $\text{ОВ}_{\text{БОК}}$ была не больше 4%. Основными статьями расходной части в балансе ОВ Красновидовского плеса были седиментация СЕД и деструкция Д (в среднем за лето 16 и 20% соответственно).

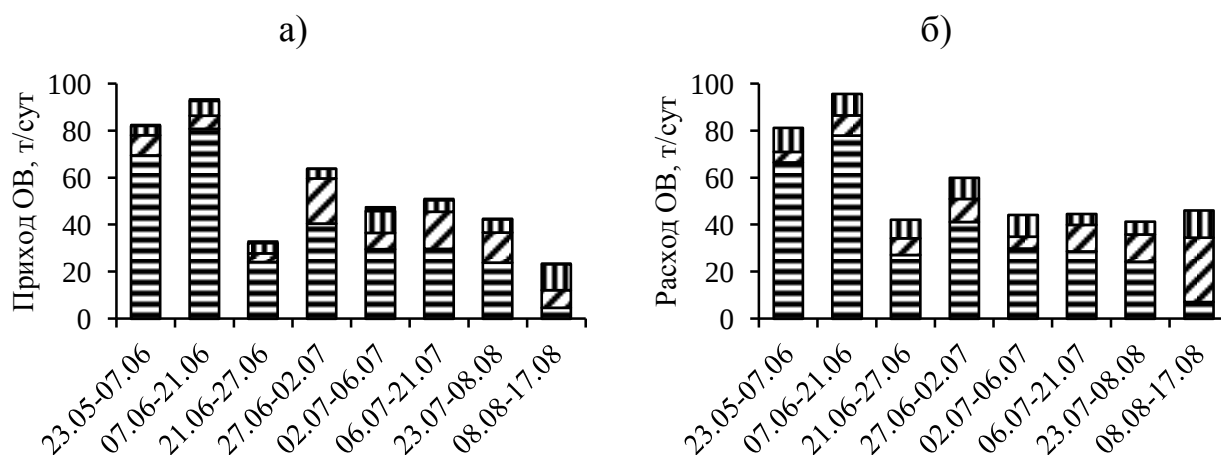


Рисунок 4. Составляющие баланса ОВ Красновидовского плеса в 2009 г.: приходные $\text{ОВ}_{\text{П}}$ (□), П (▨), ВЗМ (▤), $\text{ОВ}_{\text{БОК}}$ (■) (а) и расходные $\text{ОВ}_{\text{Р}}$ (□), Д (▨), СЕД (▤) (б)

В **заключении** перечислены основные результаты и сформулированы выводы исследования. К ним относятся следующие положения:

1. Доказано, что водохранилища (особенно слабопроточные) являются эффективными звеньями технологической цепи очистки питьевой воды, снижающими окисляемость и цветность воды. Получены статистически значимые обратные зависимости снижения цветности и окисляемости воды в водохранилищах от интенсивности их водообмена. В наибольшей степени их самоочищающая способность проявляется в отношении ЦВ, в наименьшей – в отношении БО. При прохождении речными водами водохранилищ в составе ОВ уменьшается доля трудноокисляемого аллохтонного ОВ и растет доля лабильных фракций.

2. Показано, что в водохранилищах происходит не только снижение цветности и окисляемости речных вод, но и сглаживается изменчивость временных колебаний этих показателей, причем в большей степени, чем для колебаний водного стока, что особенно важно с точки зрения технологий водоподготовки; это сглаживание тем существеннее, чем замедленнее водообмен водохранилищ.

3. Главными внутриводоемными факторами снижения содержания ЦВ и ПО являются седиментация, соосаждение со взвешенными веществами и процесс минерализации; на колебания БО существенное влияние оказывает чередование фаз «цветения» и «чистой воды» в вегетационный период; значения ПО в водохранилище могут повышаться при разложении лабильного ОВ при «цветении», значения ЦВ – при восстановлении железа и марганца из донных отложений в условиях гипоксии.

4. Интенсивность седиментации прямо пропорциональна активности ветрового перемешивания. Связь с максимальным градиентом температуры может быть как обратной (на русловых станциях), так и прямой (на мелководных станциях, перемешанных до дна). Доля ОВ в потоках взвесей снижается с глубиной по мере его минерализации. На величину седиментационных потоков в придонных горизонтах существенно влияет

режим уровня в водохранилище: при большей сработке ветровое перемешивание чаще приводит к взмучиванию донных отложений, летняя стратификация чаще разрушается и ее устойчивость ниже, поэтому большее количество взвесей достигает дна, увеличивая нагрузку ОВ на донные отложения, в которых процессы окисления этих веществ протекают замедленно.

5. По данным наблюдений на Красновидовском плесе Можайского водохранилища в летний период 2009 г. основную долю в балансе ОВ составили приток и отток ОВ. В приходную часть баланса вносят сопоставимый вклад валовая продукция и взмучивание ОВ из донных отложений, в расходную – седиментация и деструкция ОВ в водной толще.

Результаты работы могут быть использованы при разработке предложений по управлению качеством воды для ОАО «Мосводоканал», ФГУП «Канал имени Москвы», ФГУП РосНИИВХ, Московско-Окского БВУ и других структурных подразделений Федерального агентства водных ресурсов.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Соколов Д.И.**, Кременецкая Е.Р., Ломова Д.В., Аракельянц А.Д., Филиппова П.С. Особенности режима мутности в долинном водохранилище при низком уровне воды // Вестник Моск. ун-та. Серия 5: география. 2011. Вып. 3. С. 27–32.

2. Кременецкая Е.Р., Ломова Д.В., **Соколов Д.И.**, Эдельштейн К.К. Седиментация взвесей в Можайском водохранилище // Водные ресурсы. 2011. Том 38. № 4. С. 485–493.

3. **Соколов Д.И.** Изменение окисляемости и цветности воды под влиянием водохранилища // Вестник Моск. ун-та. Серия 5: география. 2013. Вып. 6. С. 9–15.

В прочих изданиях:

1. **Соколов Д.И.** Расчет содержания органических веществ в воде Иваньковского водохранилища // Эколого-гидрологические проблемы изучения и использования водных ресурсов. Сборник научных трудов. Казань: ОАО ПИК «Идел-Пресс», 2006. С. 289–292.

2. **Соколов Д.И.** Расчет цветности воды слабопроточных водоемов при помощи математического моделирования // Материалы XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». Секция географии [Электронный ресурс]. М.: Издательский центр ф-та журналистики МГУ, 2007.

3. **Соколов Д.И.** Применение математического моделирования для расчета цветности воды слабопроточных водоемов // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. II. Труды Междунар. научно-практ. конф. Пермь: изд-во ПГУ, 2007. С. 76–81.

4. **Соколов Д.И.** Цветность и перманганатная окисляемость в воде Иваньковского водохранилища // Шевченківська весна. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Вип. V. Ч. 1. Киев: ВЦ «Принт-центр», 2007. С. 171–175.

5. **Соколов Д.И.** Снижение цветности воды Иваньковского и содержания фосфора в воде Можайского водохранилища в годы средней и экстремальной водности // Материалы XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». Секция географии [Электронный ресурс]. М.: изд-во МГУ; СП МЫСЛЬ, 2008.

6. Эдельштейн К.К., Гончаров А.В., Даценко Ю.С., Пуклаков В.В., **Соколов Д.И.**, Чернега С.С. Гидроэкологические основы управления формированием качества воды в водохранилищах-источниках водоснабжения г. Москвы в экстремальные по водности годы // Материалы 8-го Международного конгресса «Вода: экология и технология» ЭКВАТЭК–2008 [электронный ресурс]. М.: ЗАО «Фирма СИБИКО Интернешнл», 2008.

7. **Соколов Д.И.**, Кременецкая Е.Р. Исследование процессов седиментации органических веществ в Можайском водохранилище // Вторая научная конференция молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» (15–18 декабря 2008 г.). Сборник трудов. М.: изд-во ИВП РАН, 2008. С. 140–143.

8. **Соколов Д.И.** Внутригодовая изменчивость притока органического вещества в Можайское водохранилище и стока из него в Москва–реку // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. II. Труды Междунар. научно-практ. конф. Пермь: изд–во ПГУ, 2011. С. 170–175.

9. Кременецкая Е.Р., Белова С.Л., **Соколов Д.И.** Особенности баланса органического вещества в долинном водохранилище в летний период при пониженном уровне воды // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. II. Труды Междунар. научно-практ. конф. Пермь: изд–во ПГУ, 2011. С. 121–126.

10. **Соколов Д.И.** Изменение годового и сезонного стока органических веществ в Учинском водохранилище // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Материалы V Всерос. симпозиума с междунар. уч. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. С. 144–148.

11. **Соколов Д.И.** Изменение годового и сезонного стока органических веществ в Ивановском, Учинском и Можайском водохранилищах // Бассейн Волги в XXI веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ: Докл. Всерос. конф. (ИБВВ РАН, Борок). Ижевск: изд–во С.А. Пермякова, 2012. С. 271–273.

12. **Соколов Д.И.** Снижение стока органических веществ р. Москвы в Можайском водохранилище // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. II. Труды Междунар. научно-практ. конф. Пермь: изд–во ПГУ, 2013. С. 175–180.

13. Кременецкая Е.Р., Законнов В.В., Ломова Д.В., **Соколов Д.И.** Структура внутриводоемных потоков взвешенных и органических веществ в Можайском водохранилище // Географический вестник. 2013. №3(26). С. 37–48.

