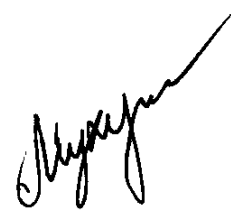


На правах рукописи



МУХУТДИНОВ Валерий Фаметдинович

**ПРОДУКТИВНОСТЬ ФИТОПЛАНКТОНА
И ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ЮМАГУЗИНСКОГО
ВОДОХРАНИЛИЩА (Р. БЕЛАЯ, БАШКОРТОСТАН) В ПЕРВЫЕ ГОДЫ
ЕГО СУЩЕСТВОВАНИЯ**

03.02.10 – Гидробиология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Борок – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии
«Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны
водных ресурсов»

Научный руководитель:

доктор биологических наук
Минеева Наталья Михайловна

Официальные оппоненты:

Сигарева Любовь Евгеньевна
доктор биологических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина
Российской академии наук, лаборатория альгологии,
ведущий научный сотрудник

Шестеркин Владимир Павлович
кандидат географических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных и экологических проблем Дальневосточного
отделения Российской академии наук,
лаборатория гидроэкологии и биогеохимии,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт экологии растений и животных Уральского
отделения Российской академии наук

Защита состоится 3 октября 2013 г. в 14 часов

на заседании диссертационного совета ДМ 002.036.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук по адресу: 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, п. Борок.

Тел./факс: 8 (48547) 24042

e-mail: dissovet@ibiw.yaroslavl.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, с авторефератом – в сети Интернет на сайтах ВАК РФ (<http://vak.ed.gov.ru/>) и ИБВВ РАН (<http://www.ibiw.ru/>).

Автореферат разослан 22 августа 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук



Л.Г. Корнева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Неотъемлемой частью современных гидроэкологических исследований является изучение структуры и функционирования водных экосистем во взаимосвязи с окружающей средой, оценка их экологического состояния, определение трофического статуса и качества воды, изменяющихся под влиянием природных и антропогенных факторов. Фитопланктону принадлежит ведущая роль в функционировании экосистем крупных пресных водоемов. В процессе фотосинтеза водоросли создают основной фонд автохтонного органического вещества (ОВ), которое вместе с поступающим в водоем аллохтонным ОВ обеспечивает энергетическую основу функционирования биологических сообществ (Винберг, 1960; Алимов, 2000). Изучение фотосинтетической продукции фитопланктона необходимо для оценки биологической продуктивности водоемов, для выяснения общих закономерностей биотической трансформации вещества и энергии в водных экосистемах. Показатели первичной продукции служат индикаторами перестройки структуры и метаболизма сообществ, антропогенного эвтрофирования водоемов, «цветения» воды. На данных по первичной продукции строится современная система трофической классификации вод (Бульон, 1981, 1993, 1994; Likens, 1975; Nakanson, Boulion, 2001, 2002; Nakanson et al., 2003).

Исследованиям первичной продукции фитопланктона озер и водохранилищ посвящено большое число работ. Однако комплексные исследования водохранилищ горного и предгорного типа, подверженных слабому антропогенному воздействию, немногочисленны (Гулая, 1975; Первичная продукция..., 1983; Гольд и др., 1985; Гидроэкологический мониторинг..., 2007, 2010). Фундаментальный научный интерес представляет изучение гидрохимического и гидробиологического режима водохранилищ на этапе становления. Данные такого плана единичны (Buska et al, 1993; Rajak, 2003), однако именно они чрезвычайно важны для выявления закономерностей преобразования экосистемы реки в быстро меняющихся условиях при формировании экосистемы нового типа. Сравнительный анализ фитопланктона и его функциональных характеристик в комплексе с гидрохимическими показателями до и после зарегулирования водотока остается актуальным. Такие данные позволяют пополнить информационную базу, необходимую для оценки состояния водных объектов и решения вопросов эксплуатации водохранилищ многоцелевого назначения.

Цель и задачи исследования.

Цель работы – выявление закономерностей формирования продуктивности фитопланктона и гидрохимического режима водохранилища горного типа со слабой антропогенной нагрузкой в первые годы его существования на примере Юмагузинского водохранилища (р. Белая, Южный Урал). Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Сравнить гидрохимический режим Юмагузинского водохранилища и р. Белая до зарегулирования.
2. Исследовать таксономический состав и динамику развития фитопланктона Юмагузинского водохранилища и р. Белая до зарегулирования.
3. Оценить содержание хлорофилла *a*, первичную продукцию и деструкцию органического вещества.
4. Выявить условия формирования фотосинтетического максимума, оценить ассимиляционную активность фитопланктона и содержание хлорофилла в единице биомассы.
5. Проанализировать связи продукционных характеристик фитопланктона с факторами среды.
6. Дать оценку трофического состояния и качества воды р. Белая до и после зарегулирования.

Научная новизна и теоретическая значимость. Работа направлена на решение теоретических проблем продукционной гидробиологии, связанных с формированием и функционированием автотрофного сообщества в водохранилище горного типа на этапе становления.

Впервые для региона Южного Урала проведены комплексные исследования гидрохимического режима и продуктивности фитопланктона в первые годы существования Юмагузинского водохранилища. Установлено, что изменения гидрологических и гидрохимических характеристик, произошедшие в р. Белая после зарегулирования и вызвавшие увеличение продуктивности планктонных альгоценозов во вновь созданном водохранилище, обусловлены снижением проточности, подтоплением новых площадей, выщелачиванием почв и горных пород, образованием глубоководных зон, антропогенным манипулированием уровнем. На основе анализа связи продукционных характеристик с факторами среды показано, что наиболее требователен к внешним условиям фитопланктон в период вспышки трофии, отмеченной на третий год существования водохранилища. Получены количественные зависимости между продукционными показателями, которые могут быть использованы в прогностических целях.

Практическая значимость. Работа выполнена в рамках плановых тем РосНИИВХ: «Разработать прогноз гидрохимического и гидробиологического состояния проектируемого Юмагузинского водохранилища с учетом режимов его эксплуатации», рег. номер 03243, 01.2003; «Провести исследование территории затопления Юмагузинского водохранилища и районировать его акваторию по физико-химическим, морфометрическим и гидробиологическим критериям для отметки 238–247 м», 2004; «Проведение комплексного мониторинга Юмагузинского водохранилища на р. Белая РБ в период его формирования и стабилизации», 2005; «Проведение комплексного мониторинга Юмагузинского водохранилища на период его формирования и стабилизации», 2006; «Проведение комплексного мониторинга Юмагузинского водохранилища на

период его формирования и стабилизации», 2007. Получены количественные зависимости между продукционными показателями и факторами среды, которые могут использоваться в прогностических целях. Дана оценка трофического статуса и качества воды горного водотока и вновь образованного водохранилища горного типа.

Результаты исследований вошли в научные отчеты для «ООО Юмагузинское водохранилище»: по разработке прогноза гидрохимического и гидробиологического состояния водохранилища; по районированию, комплексному мониторингу с рекомендациями мероприятий по ликвидации возможных негативных явлений, а также формированию предложений по режиму эксплуатации с получением заданных качества воды и состояния водоема.

Защищаемые положения.

На этапе становления экосистемы водохранилища горного типа в условиях слабого антропогенного воздействия гидрохимический режим нового водохранилища незначительно отличается от речного и формируется под действием выщелачивания почв и горных пород в зависимости от степени подготовки ложа и площади обводнения.

Показатели продуктивности фитопланктона (численность, биомасса, содержание хлорофилла, скорость фотосинтеза) в первые годы после зарегулирования возрастают в соответствии с изменением проточности и колебаниями уровня, за счет поступления органических и биогенных веществ.

Максимум биологической продуктивности достигается на третий год существования водохранилища. Трофический статус водоема соответственно меняется от мезотрофного к эвтрофному, а качества воды снижается от II класса к III, от «чистой» до «удовлетворительной чистоты».

Апробация работы. Основные положения работы были доложены на Всероссийских научных конференциях: «Современные аспекты экологии и экологического образования» (Казань, 2005 г.), IX съезд Гидробиологического общества при РАН (Тольятти, 2006 г.), V Люблинские чтения «Теоретические проблемы экологии и эволюции. Теория ареалов: виды, сообщества, экосистемы» (Тольятти, 2010 г.), «Современные проблемы гидроэкологии» (Санкт-Петербург, 2010 г.), «Чистая вода России» (Екатеринбург, 2011 г.).

Личный вклад автора. Диссертационная работа основана на материалах полевых исследований, собранных лично автором в составе комплексных экспедиций РосНИИВХ за период 2002–2007 гг. Автором сформулирована проблема, поставлены задачи, проанализированы результаты исследований, сформулированы выводы и обобщения. В работе использованы данные по составу и развитию фитопланктона, полученные Е.А. Бутаковой и представленные в совместных публикациях. Измерения первичной продукции и деструкции в полевых условиях, определение содержания хлорофилла в лаборатории выполнено непосредственно автором.

Химические анализы выполнены в лаборатории аналитического контроля вод РосНИИВХ. Доля личного участия автора в совместных публикациях пропорциональна числу авторов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 160 печатных страницах, состоит из введения, 6 глав, списка литературы, содержит 51 рисунок и 28 таблиц. Список литературы содержит 269 источников, в том числе 40 иностранных.

Благодарности. Выражаю свою глубокую признательность научному руководителю, д.б.н. Н.М. Минеевой за консультации и помощь при написании диссертации. За консультации, помощь и поддержку искренне благодарю заведующего отделом Восстановления рек и водоемов РосНИИВХ д.т.н. А.Н. Попова, к.б.н. А.И. Пашкевича, сотрудника ИЭРиЖ УРО РАН – к.б.н. М.И. Ярушину. Искренне признателен Е.А. Бутаковой за обработку проб фитопланктона и написание совместных публикаций; сотрудникам химической лаборатории РосНИИВХ во главе с Г.А. Оболдиной за выполнение химических анализов и консультации; О.С. Ушаковой за техническую помощь при оформлении работы. Особую благодарность выражаю Т.Е. Павлюку, А.А. Минину, С.Ю. Мельникову, А.С. Фоминых за помощь и содействие в сборе полевого материала.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. ФОРМИРОВАНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА ВОДОХРАНИЛИЩ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Создание водохранилищ коренным образом меняет гидрологические и гидрохимические условия, а также гидробиологический режим водоема в зоне подпора. Во многих работах указано, что формирование химического состава вод водохранилищ определяется главным образом составом вод питающих его рек. В гидрохимическом режиме отражаются региональные особенности территории (Денисова, 1979; Попов, Эдельштейн, 2001). В первые годы существования водохранилищ основным источником поступления в воду органических и биогенных веществ является залитое ложе и продукция фитопланктона; важное значение имеет степень подготовки ложа (Денисова, 1979; Лабутина, 1985; Сусекова, Оганесян, 1996; Мордовин и др., 1997; Шестеркин, 2005). Среди факторов, влияющих на динамику и распределение химических веществ в условиях зарегулированного стока, значительную роль играют степень водообмена, гидрометеорологическая обстановка, процессы осаждения, сорбции и десорбции элементов донными отложениями (Авакян и др., 1994).

Происходящие изменения затрагивают всю биоту от бактериопланктона до ихтиофауны (Луферова, 1965; Поддубный, Шаронов, 1965; Кожова, 1970; Кузьмин, 1971; Алексеевна, Гореликова, 1980; Митропольский, 1982; Охупкин, 1994). После зарегулирования и резких перестроек комплекса основных абиотических факторов среды, определяющих жизнедеятельность

планктонных альгоценозов, происходит последовательное и закономерное изменение их состава и продуктивности (Жадин, 1938; Баранов, 1961; Кузьмин, 1971; Шаларь, 1971; Кожова, 1970; 1978; Водохранилища мира, 1979; Воробьева, 1995; Авакян, 1987; Кузнецов, Зиганшина, 1991; Кудерский, 1992; Sladeček, 1990; Straškraba et al, 1990; Schetagne, 1992; Wilk-Wozniak, 2003). Сукцессия лимногенеза накладывается на процессы олиготрофно-эвтрофной сукцессии (Трифонова, 1994; Охапкин, 1994, 1997; Whitton, 1974).

По мере становления экосистемы водохранилища видовое разнообразие фитопланктона меняется в зависимости от особенностей морфометрии, гидрологического режима, климата, окружающего ландшафта (Кожова, 1970; Кузьмин, 1971; Киевское водохранилище, 1972; Отказненское водохранилище, 1973; Гавришова и др., 1980; Планктон Братского..., 1981; Баринава, Кухаренко, 1981; Баринава, 1983а, б, 1984, 1986; Локоть и др, 1985; Васильчикова, 1989; Третьякова, 1989; Ярушина, 1989; Современное состояние..., 1993; Охапкин, 1994; Охапкин и др., 1997; Щербак 1997; Корнева, 2001; Трифонова, 2004; Шкундина, 2004; Медведева, 2005; Leitão & L'eglize, 2000; Rajak, 2003; Wilk-Wozniak 2003). Важную роль в развитии водорослей играет характер эксплуатации водохранилища, включая уровенный режим. Продукционные процессы в водохранилищах протекают с большей скоростью, чем в равнинных (Ковалевская, Михеева, 2004) и горных реках (Энхтуяа Амгабаазар, Копылов, 2004). Вспышка первичной продукции в начальный период существования водохранилищ соответствует «трофическому взрыву» (эффект подпора) и обусловлена влиянием затопленного ложа, уменьшением скорости течения, увеличением прогрева и глубины проникновения солнечной радиации (Баранов, 1961; Балабанова, 1964; Приймаченко, 1966; Кожова, 1970, 1979; Кузьмин, 1974).

Глава 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материал собран в основные фазы гидрологического цикла – весеннее половодье и летнюю межень в 2002–2003 гг. на р. Белая до зарегулирования, а затем в 2004–2007 гг. на вновь созданном Юмагузинском водохранилище. Наблюдения на реке проводили на 15 станциях, на водохранилище – на 31 станции, расположенной по медиали. Выбор станций соответствует районированию водохранилища (Павлюк, 2007).

Пробы воды отбирали батометром Молчанова с поверхности, далее, в зависимости от прозрачности воды S , с глубин $1/2S$, S , $2S$, $3S$ и из придонного слоя. На каждой станции измеряли температуру воды, прозрачность, электропроводность, содержание растворенного кислорода. Для характеристики гидрохимического режима определяли рН воды, формы азота и фосфора (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , $\text{N}_{\text{общ}}$, PO_4^{3-} , $\text{P}_{\text{общ}}$), содержание основных ионов (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Si^{4+}), ХПК, перманганатную окисляемость (ПО). Анализы проводили в лаборатории аналитического контроля вод ФГУП РосНИИВХ (аттестат аккредитации № РОСС.RU.0001.513459) по методикам ранга ПНД Ф.

Для характеристики продуктивности фитопланктона определяли содержание хлорофилла *a* (Хл *a*) стандартным спектрофотометрическим методом в смешанном ацетоновом экстракте (SCOR-UNESCO, 1966; Lorenzen, Jeffrey, 1980). Фитопланктон концентрировали на мембранные фильтры «Владипор» МФА-МА №10 с размером пор 0,95–1,0 мкм. Концентрацию хлорофилла *a* рассчитывали по формуле Джеффри и Хамфри (Jeffrey, Hamphrey, 1975).

Первичную продукцию и деструкцию ОВ определяли скляночным методом в кислородной модификации (Винберг, 1960; Бульон, 1981, 1983, 1993, 1994; Пырина, 1993). Склянки экспонировали 24 часа *in situ* на трех–пяти горизонтах в пределах фотической зоны. Содержание растворенного кислорода измеряли методом Винклера (Алекин, 1952; Методы..., 1988). Первичную продукцию и деструкцию под квадратным метром (ΣA и ΣR) рассчитывали интегрированием кривых их вертикального профиля (Методические рекомендации..., 1983). Для перевода единиц кислорода в единицы углерода использовали коэффициент 0,3 (Бульон, 1983). Всего отобрано 101 проба для химических анализов, 120 – для определения концентрации хлорофилла, выполнено 48 экспериментов по определению первичной продукции и деструкции планктона.

В работе использованы материалы по численности, биомассе и составу фитопланктона, обработанные сотрудницей отдела Восстановления рек и водоемов РосНИИВХ Е.А. Бутаковой и представленные в совместных публикациях. Данные по уровням и расходам воды на Юмагузинском гидроузле любезно предоставлены сотрудниками группы мониторинга водохранилища.

Для оценки трофического статуса водохранилища использовали содержание хлорофилла, общего фосфора, прозрачность воды, скорость фотосинтеза, интегральную первичную продукцию, ИТС (Бульон, 1994, 1997), биомассу фитопланктона (Китаев, 1984). Интегральная оценка качества воды р. Белая и Юмагузинского водохранилища дана на основе комплексной экологической классификации качества поверхностных вод по гидрохимическим и гидробиологическим показателям (Оксиюк и др., 1993) с применением метода ранжирования средних и медианных значений. При анализе данных использовали стандартные статистические методы (Лакин, 1968), реализованные в виде пакета прикладных программ Microsoft Excel для ПЭВМ.

Глава 3. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УЧАСТКА РЕКИ БЕЛАЯ В РАЙОНЕ ЮМАГУЗИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Река Белая относится к бассейну Волги и является самым крупным и многоводным притоком р. Камы. Общая длина р. Белая 1430 км, площадь водосбора 142 тыс. км². Участок от г. Белорецка до д. Сыртланово горный. Среднегодовой сток в створе гидроузла составляет около 2100 млн. м³, расход 66,5 м³/с. Большая часть годового стока (до 80%) приходится на период весеннего половодья со средним максимальным расходом 1000 м³/с. Питание реки

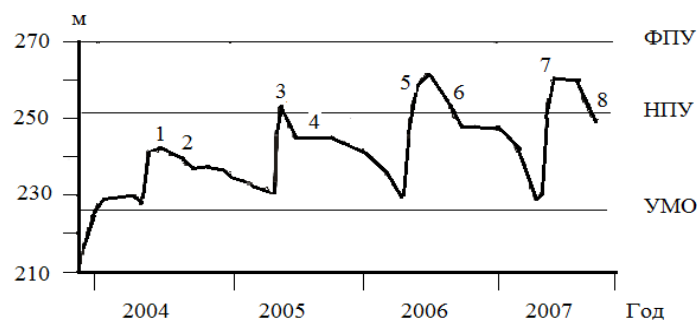


Рис. 1. Изменение уровня Юмагузинского водохранилища в 2003–2007 гг. (1, 3, 5, 7 – половодье; 2, 4, 6, 8 – межень. ФПУ – форсированный уровень, НПУ – нормальный уровень, УМО – уровень мертвого объема).

Ежегодно после пика половодья производился сброс воды: в 2004 г. – на 4 м, в 2005 г. – на 8 м, а в 2006 и 2007 гг. – на 9 м. К началу половодья уровень снижался до отметки близкой к УМО. В первые два года заполнения были подтоплены площади с полной лесосводкой, и ложе водохранилища на этом участке было представлено скальными породами. На третий и четвертый год обводнению подвергались неподготовленные площади с почвенным покровом и древесно-кустарниковой растительностью.

Глава 4. ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ЮМАГУЗИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ПЕРВЫЕ ГОДЫ ЕГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

Формирование химического состава воды – сложный и многогранный процесс, который протекает в зависимости от комплекса абиотических, биологических и антропогенных факторов, связанных с функционированием водной экосистемы и природными условиями водосбора.

После зарегулирования р. Белая произошли заметные изменения в термическом режиме водотока. В Юмагузинском водохранилище отмечен более ранний прогрев водных масс и увеличение температуры воды в половодье, что благоприятно для развития биоты, протекания продукционно-деструкционных процессов и процессов самоочищения. За счет интенсивного прогрева и натекания более теплых низкоминерализованных вод половодья на более холодные зимние воды в приплотинной части формировалась термическая стратификация. Разница температуры поверхностного и придонных слоев составляла 8–10°C.

Прозрачность воды в водохранилище по сравнению с рекой увеличилась вдвое. Максимальные величины отмечены в половодье первого года существования водохранилища, в результате чего увеличилась толщина трофогенного слоя. На четвертый год при интенсивном развитии фитопланктона прозрачность снизилась.

Активная реакция среды (рН) после зарегулирования фактически не изменилась и составляла 7,6–8,9. Олиго-щелочные воды водохранилища дают возможность для вегетации широкого спектра видов водорослей от индифферентов и алкалифилов до алкалибионтов.

Кислородный режим р. Белая до зарегулирования был благоприятным для развития гидробионтов. После зарегулирования в водохранилище образовались глубоководные зоны, в придонных слоях которых в половодье отмечена недонасыщенность, а в межень дефицит кислорода. В первые два года в гипolimнионе отмечалось присутствие сероводорода, явившееся результатом слабой проточности и интенсивного расхода кислорода на окисление растительных остатков. Перенасыщение воды кислородом имело место лишь во время массового развития водорослей в верхних слоях воды.

По ионному составу вода Юмагузинского водохранилища относится к пресной среднеминерализованной, к гидрокарбонатному классу кальциевой группе (Алекин, 1970). В составе основных ионов преобладают анионы HCO_3^- и катионы Ca^{2+} (табл. 1). От половодья к межени наблюдалось увеличение содержания всех анионов и катионов, а также общей минерализации, величина которой составляла 102–194 мг/л в половодье и 161–240 мг/л в межень. На третий год отмечено небольшое снижение суммы ионов, что свидетельствует о спаде выщелачивания солей из ложа водохранилища.

В первые годы после зарегулирования к биогенным и органическим веществам, поступающим с водосбора, прибавилось их поступление из залитого ложа. Однако за счет разбавления, интенсивных внутриводоемных процессов и потребления фитопланктоном после зарегулирования отмечено снижение содержания минерального и общего азота, особенно существенное в половодье (табл. 1). Лишь количество аммонийного азота незначительно увеличивалось в межень за счет процессов аммонификации при разложении растительных остатков.

Содержание минерального фосфора после зарегулирования увеличивалось в половодье в связи с поступлением с водосбора и выщелачиванием из ложа при ежегодном увеличении площади литорали. Содержание общего фосфора снижалось в половодье, но возрастало в межень благодаря увеличению доли органического фосфора, а в целом после зарегулирования увеличилось в 1,5 раза. Зарегулирование привело к снижению содержания кремния в 1,7 раза, железа в 2,7 раза в результате внутриводоемных процессов и потребления фитопланктоном.

Показатели органического вещества (ХПК, перманганатная окисляемость, цветность воды) как в реке, так и во вновь созданном водохранилище характеризовались повышенными величинами в период половодья и снижением в межень. После зарегулирования отмечено небольшое увеличение ХПК и ПО, свидетельствующее об интенсификации процессов окисления органического вещества, источником которого является затопленная растительность и почвы (табл. 1).

Таблица 1. Содержание основных ионов, биогенных и органических веществ в р. Белая (2002–2003 гг.) и Юмагузинском водохранилище (2004–2007 гг.).

Показатель	Р. Белая		Юмагузинское водохр.	
	Половодье	Межень	Половодье	Межень
Основные ионы				
Ca ²⁺ , мг/л	22,0±4,4	24,5±4,9	21,7±4,3	29,1±5,8
Mg ²⁺ , мг/л	6,8±2,0	9,4±2,7	6,0±1,7	8,4±2,4
Na ⁺ , мг/л	2,2±0,3	2,9±0,4	5,8±0,8	7,3±1,0
K ⁺ , мг/л	1,0±0,1	0,76±0,1	0,73±0,1	0,55±0,1
HCO ₃ ⁻ , мг/л	106±21	159±32	105±21	147±29
Cl ⁻ , мг/л	3,1±0,7	4,4±0,9	2,8±0,6	4,6±1,0
SO ₄ ²⁻ , мг/л	13,6±2,7	22,1±4,4	15,0±3,0	16,1±3,2
∑ ионов, мг/л	155±46	223±67	156±47	212±64
Биогенные вещества				
NH ₄ ⁺ , мг/л	0,34±0,075	0,13±0,01	0,18±0,04	0,22±0,05
NO ₂ ⁻ , мг/л	0,015±0,004	0,017±0,004	0,023±0,006	0,024±0,006
NO ₃ ⁻ , мг/л	1,64±0,3	0,47±0,1	0,41±0,07	0,68±0,05
N _{общ.} , мг/л	2,5±0,7	1,0±0,3	1,1±0,3	1,2±0,3
P-PO ₄ ³⁻ , мкг/л	17±2,5	11,2±1,7	29±4,3	13±2,0
P _{общ.} , мкг/л	44±11	20±5	41±10	40±10
Si ⁴⁺ , мг/л	2,8±0,3	1,7±0,2	1,2±0,2	1,4±0,2
Fe _{общ.} , мг/л	0,34±0,08	0,12±0,02	0,1±0,02	0,07±0,01
Органическое вещество				
Цветность, град.	53±11	23±5	42±8	20±4
ХПК, мгО/л	15±5	10±3	15±5	11±3
ПО, мгО/л	6,2±0,6	3,6±0,4	6,0±0,6	4,7±0,5

В водохранилище выявлена вертикальная неоднородность в распределении гидрохимических показателей. Как правило, с глубиной возрастала минерализация, содержание общих и минеральных форм азота и фосфора, кремния, общего железа, органического вещества. Снижение содержания биогенных веществ в фотическом слое обусловлено активной деятельностью фитопланктона. Особенности гидрохимического режима Юмагузинского водохранилища в разные сезоны связаны с морфометрией ложа, степенью его подготовки, режимом уровня и проточностью. Снижение уровня воды в водохранилище в межень, особенно в последние два года, приводило к росту концентрации ряда веществ в верховье, что было связано с активизацией внутриводоемных процессов при нарушении стратификации.

Глава 5. ФОРМИРОВАНИЕ И ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ ФИТОПЛАНКТОНА НА ЭТАПЕ СТАНОВЛЕНИЯ ЮМАГУЗИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

В составе фитопланктона р. Белая в 2002 и 2003 гг. было выявлено 78 и 97 таксонов. После зарегулирования, начиная со второго года, общее таксономическое разнообразие увеличилось до 102–108 таксонов. Зеленые и диатомовые водоросли сохраняли свое лидирующее положение на протяжении всего периода исследований (рис. 2), но в водохранилище изменилось соотношение водорослей разных отделов. В два раза возросло число видов зеленых водорослей, в восемь раз –

синезеленых, в пять раз – число прочих видов. Увеличение разнообразия синезеленых связано с формированием потамофильных условий.

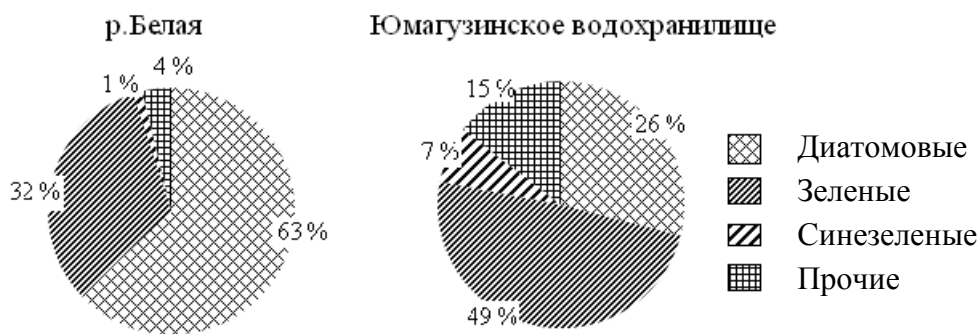


Рис. 2. Таксономическая структура фитопланктона р. Белая (2002–2003 гг.) и Юмагузинского водохранилища (2004–2007 гг.).

В первые же годы после зарегулирования в водохранилище отмечен рост численности и биомассы фитопланктона (рис. 3). Этому способствовало снижение проточности и обогащение водной толщи биогенными веществами из затопленного ложа. Максимальные численность и биомасса зафиксированы на третий год при преобладании жаркой безветренной погоды, при низкой водности, снижении интенсивности водообмена и резком повышении содержания биогенов. В половодье наблюдалось массовое развитие диатомовых, в межень – синезеленых водорослей. Численность и биомасса фитопланктона снизилась на четвертый год при повторном обводнении площадей и снижении поступления биогенов

Содержание хлорофилла *a* в р. Белая варьировало от 0,1 до 19,1 мкг/л и составляло в среднем 3,0–7,6 мкг/л. После зарегулирования оно плавно увеличивалось и, начиная со второго года существования водохранилища, стало выше, чем в реке (рис. 4). Максимальные показатели (до 41 мкг/л) отмечены в межень 2006 г. в период массового развития синезеленых водорослей, которое достигло уровня «цветения» воды. Известно, что пороговой величиной «цветения» считается концентрация хлорофилла выше 25 мкг/л (Сиренко, 1978).

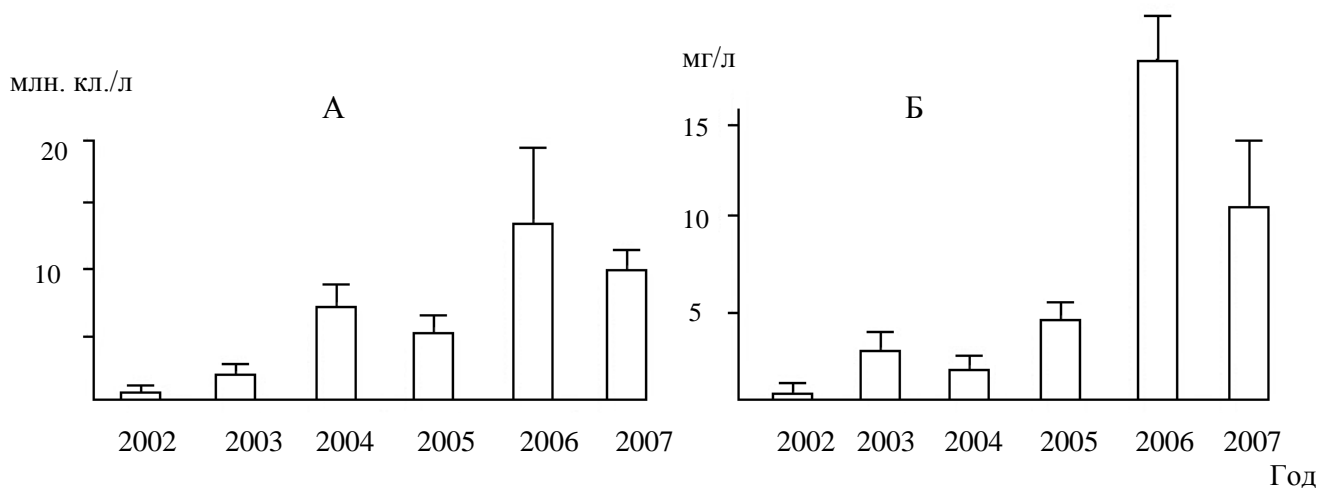


Рис. 3. Динамика численности (А) и биомассы (Б) фитопланктона в р. Белая (2002–2003 гг.) и Юмагузинском водохранилище (2004–2007 гг.).

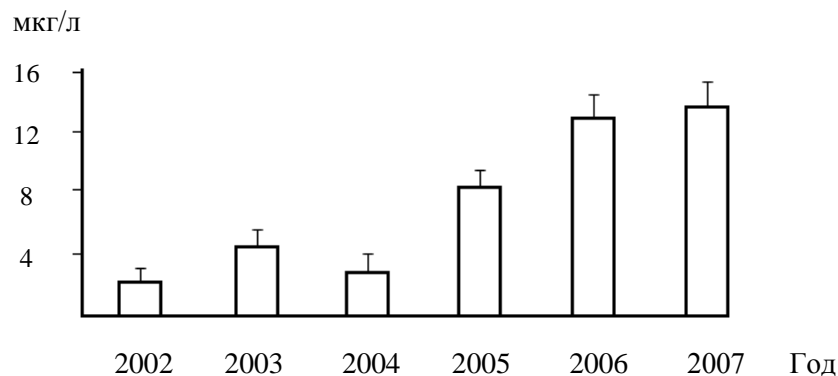


Рис. 4. Содержание хлорофилла *a* в р. Белая (2002–2003 гг.) и Юмагузинском водохранилище (2004–2007 гг.).

Первичная продукция планктона (A_{max} и ΣA) для р. Белая, рассчитанная по концентрации хлорофилла и прозрачности воды (Бульон, 1983), составила 0,003–0,29 мгС/(л сут) и 0,005–0,43 гС/(м² сут). После зарегулирования скорость максимального фотосинтеза возросла в 3–4 раза и варьировала от 0,12 до 1,05 мгС/(л сут). Средние величины A_{max} в Юмагузинском водохранилище в период половодья в основном были выше, чем в межень, за исключением 2006 г. В половодье повышенный фотосинтез чаще наблюдался на нижних станциях перед плотиной, а в межень в озерно-речной части, что было связано с режимом эксплуатации водохранилища, гидрохимическими условиями и сезонным развитием фитопланктона. Среднесезонные величины A_{max} с 2004 по 2007 гг. постепенно нарастали от 0,34 до 0,54 мгС/(л сут). Интегральная первичная продукция варьировала от 0,19 до 2,51 гС/(м² сут). Самые высокие значения получены в половодье двух первых лет. С 2004 по 2006 гг. она снижалась от 1,09 до 0,75 гС/(м² сут) (рис. 5). Средняя за весь период исследований величины ΣA составила 0,95 гС/(м² сут).

Динамика первичной продукции типична для начального этапа формирования гидробиологического режима новых водохранилищ, совсем не подверженных или подверженных слабому антропогенному воздействию. Аналогичная картина увеличения A_{max} в первые годы и сходная интегральная первичная продукция получены в горном Бухтарминском водохранилище (Гулая, 1975) и в предгорном Братском (Кожова, 1973).

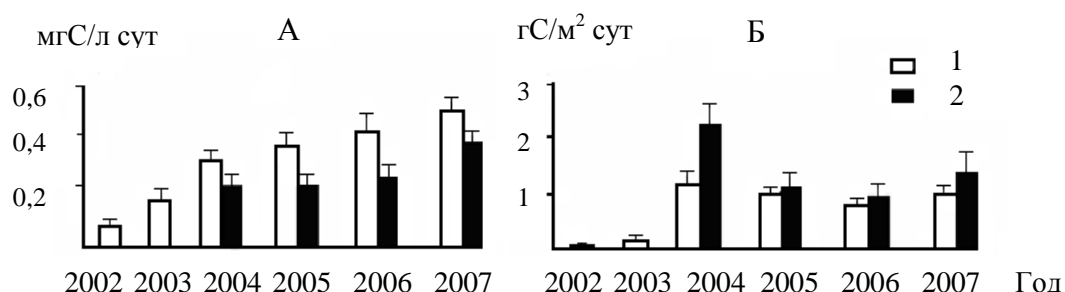


Рис. 5. Первичная продукция (1) и деструкция ОВ (2) в р. Белая (2002–2003 гг.) и Юмагузинском водохранилище (2004–2007 гг.) (А – в единице объема воды, Б – под м²).

Определение первичной продукции *in situ* позволило выявить оптимальные условия для первичного продуцирования фитопланктона Юмагузинского водохранилища. В 32 из 47 опытов максимум вертикального профиля фотосинтеза располагался у поверхности, в 11 опытах – на глубине ½ прозрачности, в 4 опытах – на глубине одной прозрачности. Средняя величина A_{max} в водохранилище во всех трех случаях составляла 0,40 мгС/(л сут). Приуроченность A_{max} к поверхности отмечалась при повышенном содержании Хл *a*, нитратного азота и общего фосфора, но при более низкой температуре воды и меньшей концентрации минерального фосфора. Смещению A_{max} на глубину ½ прозрачности способствовало снижение содержания Хл *a* и прозрачности, общего и нитратного азота, а также общего фосфора, при одновременном повышении температуры воды и минерального фосфора. Заглубление A_{max} до глубины одной прозрачности отмечалось при снижении содержания Хл *a* и нитратного азота при одновременном повышении прозрачности (табл. 2). В тех случаях, когда фотосинтетический максимум располагался у поверхности, A_{max} тесно коррелировал только с Хл *a* ($r = 0,71, n = 32$), теснота связи с абиотическими факторами (температура, прозрачность, содержание общего и минерального азота и фосфора) была умеренной ($r = 0,31-0,47$). На глубине ½ прозрачности получена статистически значимая корреляция A_{max} с Хл *a*, общим фосфором и прозрачностью ($r = 0,69-0,81, n = 11$). На глубине одной прозрачности связь между A_{max} и Хл *a* стала менее тесной ($r = 0,58$), а коэффициенты корреляции с прозрачностью, содержанием кремния, общего и минерального фосфора, минерального азота были высокими (0,75–0,99). Отрицательный характер связи с прозрачностью в первом и втором случаях, при расположении максимума в верхних горизонтах, свидетельствует о световом ингибировании фотосинтеза. При заглублении максимума положительная связь с прозрачностью указывает на световое лимитирование, а отрицательная связь с минеральным азотом – на его потребление фитопланктоном.

Таблица 2. Условия формирования фотосинтетического максимума в Юмагузинском водохранилище.

Фактор	Глубина расположения A_{max}		
	Поверхность	½ прозрачности	Прозрачность
A_{max} , мгС/(л сут)	0,40±0,04	0,40±0,04	0,40±0,04
Хл <i>a</i> , мкг/л	9,5 ± 1,0	8,8 ± 0,9	5,7 ± 0,6
Прозрачность, м	2,8 ± 0,2	2,4 ± 0,2	3,0 ± 0,2
Температура, °С	20,9 ± 0,3	21,6 ± 0,5	21,3 ± 0,8
N _{общ} , мг/л	1,1 ± 0,3	1,0 ± 0,3	1,2 ± 0,3
NO ₃ ⁻ , мг/л	0,6 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,3 ± 0,1
P _{общ} , мкг/л	53 ± 13	40 ± 10	41 ± 10
PO ₄ ³⁻ , мкг/л	17 ± 3	21 ± 3	23 ± 3,5

Деструкция органического вещества (R) варьировала от очень низких величин до 1,26 мгС/(л сут), а средние – от 0,12 до 0,47 мгС/(л сут). Интегральная деструкция (ΣR) составляла 0,89–2,38 гС/(м² сут). Самая высокая ΣR получена в первый год существования водохранилища,

затем она снизилась в 2,5 раза. От половодья к межени ΣR снижалась, что свидетельствовало о преобладании аллохтонного ОВ весной. Новый подъем ΣR в межень 2007 г. является результатом внутриводоемных процессов и увеличения доли автохтонного ОВ, синтезированного фитопланктоном. Средняя ΣR за весь период наблюдения составила $1,46 \pm 0,2$ гС/(м² сут).

Соотношение интегральной первичной продукции и деструкции ($\Sigma A/\Sigma R$) варьировало от 0,2 до 4,8. Средние для сроков наблюдения величины в большинстве случаев были ниже 1, и только в межень 2006 г. – выше 1. Осредненные величины $\Sigma A/\Sigma R$ были ниже единицы, что указывает на типичный для водохранилищ гетеротрофный характер функционирования экосистемы.

Формирование фотосинтетической продукции зависит не только от внешних условий и уровня развития фитопланктона, но также от его состава и состояния. Полезную информацию о состоянии и продукционном потенциале водорослей несут соотношения продукционных показателей – биомассы, содержания хлорофилла, интенсивности фотосинтеза.

Тесная линейная связь выявлена между биомассой фитопланктона и содержанием хлорофилла ($r^2 = 0.50$), а также между содержанием хлорофилла и скоростью фотосинтеза ($r^2 = 0.71$). Содержание хлорофилла в единице сырой биомассы (Хл/Б) в р. Белая до создания водохранилища варьировало от 0,05 до 3,29%, а средняя величина составила $0,83 \pm 0,18\%$. После зарегулирования отношение Хл/Б снизилось до $0,24 \pm 0,03\%$ и стало более стабильным. Суточные ассимиляционные числа изменялись в пределах 15–457 мгС/мг Хл, средняя для водохранилища величина САЧ равняется 65 ± 20 мгС/мг Хл. Полученные значения сопоставимы с данными для других водоемов (Бульон, 1981, 1983; Кожова, 1983; Охупкин, 1994; Экология фитопланктона..., 1999; Минеева, 2003; Гусев, 2007).

Динамика развития фитопланктона Юмагузинского водохранилища в годы становления носила сложный характер и зависела от всего комплекса экологических условий (табл. 3). Анализ связи биомассы и содержания хлорофилла с факторами среды показывает, что в два первых года отмечалась отрицательная связь с формами азота и фосфора, свидетельствовавшая о потреблении биогенов фитопланктоном. Положительные связи, отмечаемые чаще в 2006 г., отражали потребности водорослей в той или иной форме минерального питания. Обратная связь с прозрачностью свидетельствует о преобладании в водохранилище водорослевой взвеси. Судя по общему количеству выявленных корреляционных связей, наиболее требовательным к условиям среды фитопланктон был в межень 2006 г., когда максимальными были его видовое разнообразие (108 таксонов), численность (18900 тыс. кл./л), биомасса (10 мг/л), содержание Хл *a* (19,0 мкг/л) и интенсивность фотосинтеза (0,68 мг С/(л сут)).

Анализ данных, осредненных за каждый период наблюдения, выявил прямую зависимость биомассы фитопланктона от уровня водохранилища, рН воды, цветности, содержания общего фосфора. Отрицательная связь биомассы прослеживается с суммой ионов и содержанием кремния. Прямая зависимость концентрации хлорофилла выявлена от уровня водохранилища, общего азота

и общего фосфора. Фотосинтез положительно коррелировал с содержанием хлорофилла, общего азота и общего фосфора, отрицательно – с прозрачностью воды.

Таблица 3. Характеристика связи биомассы фитопланктона и содержания хлорофилла в Юмагузинском водохранилище с факторами среды в половодье (П) и межень (М) 2004–2006 гг. (+ и - положительная и отрицательная зависимость при $r > r_{0,05} = 0,53$).

Показатель	Биомасса		Хлорофилл	
	+	-	+	-
Температура		2006 _М	2005 _П	2006 _М
Прозрачность	2005 _М	2004 _П , 2006 _М		2004–2006 _М
Электропроводность	2006 _М	2005 _М , 2006 _П	2005 _П , 2005, 2006 _М	2004, 2006 _П
pH	2004 _П	2006 _{П,М}		2004 _П , 2006 _{П,М}
Fe _{общ}	2004, 2005 _П		2006 _М	
Si ⁴⁺	2006 _М		2004 _П , 2006 _М	2005 _П
N _{общ}	2004–2006 _М	2006 _П		2005 _М , 2006 _{П,М}
N-NO ₃ ⁻		2004 _П	2006 _М	2004 _П
N-NH ₄ ⁺	2006 _{П,М}	2005 _М	2005, 2006 _М	2005 _П
P _{общ}	2006 _М	2005 _М	2005, 2006 _М	
P-PO ₄ ³⁻	2004, 2006 _М		2004, 2006 _М	2005 _П

В целом, в Юмагузинском водохранилище продукционные процессы протекали аналогично другим горным и предгорным водохранилищам. При этом массовое развитие синезеленых водорослей и «цветение» воды проявилось только на третий год в межень.

Глава 6. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЮМАГУЗИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Трофический статус водотока р. Белая в 2002 г. изменялся от мезотрофного в половодье до олиготрофно-мезотрофного в межень, а в 2003 г. – от мезотрофно-эвтрофного до мезотрофного. После зарегулирования в оба сезона 2004 и 2005 гг. водохранилище характеризовалось как эвтрофное. Лишь в половодье 2006 г. трофический статус снизился до мезотрофного. Во все последующие периоды трофическое состояние водохранилища оставалось эвтрофным. Такая же оценка трофического статуса дана в работе В.А. Тюра (2009). В целом начальный этап существования водохранилища характеризуется умеренным повышением трофии (табл. 4).

Таблица 4. Трофический статус и качество воды р. Белая и Юмагузинского водохранилища в половодье (1) и межень (2) (по: Бульон, 1997; Оксенок и др., 1993).

Показатель	Река Белая				Юмагузинское водохранилище							
	2002		2003		2004		2005		2006		2007	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Трофия	М	О-М	М-Э	М	Э	Э	Э	Э	М	Э	Э	Э
Класс и разряд качества	2б	2б	3а	2б	Эпилимнион							
					2а	2а	2б	2а	3а	3а	3б	3б
					Гиполимнион							
					3б	2б	3а-3б	2б	3а	3а	-	-

Примечание. О-М – олиготрофно-мезотрофный, М – мезотрофный, М-Э – мезо-эвтрофный, Э – эвтрофный.

Качество воды р. Белая до зарегулирования варьировало от II класса «чистая» до III «удовлетворительной чистоты», с разрядами от «вполне чистая» до «достаточно чистая». В первые два года после зарегулирования качество воды эпилимниона соответствовало II классу «чистая» с разрядом «очень чистая». На третий и четвертый год качество воды снизилось до III класса – «удовлетворительной чистоты» с разрядами от «достаточно чистой» до «слабо загрязненной».

Качество воды гипolimниона, оцененное по гидрохимическим показателям, характеризовалось, как и эпилимнион, переходным состоянием между II и III классами. Учитывая ухудшение состояния вод гипolimниона в периоды обнаружения дефицита кислорода и сероводородной зоны, качество воды в межень 2004 и 2005 гг. следует квалифицировать не II и III, а V классом – «грязная» с разрядами от «весьма грязной» до «предельно грязной».

ВЫВОДЫ

1. Создание Юмагузинского водохранилища привело к изменениям гидрологических и гидрохимических характеристик вод р. Белая, обусловленным снижением проточности, подтоплением новых территорий, выщелачиванием почв и горных пород, образованием глубоководной зоны, антропогенным манипулированием уровнем. В водохранилище отмечен более ранний прогрев водных масс и более позднее их охлаждение, увеличение содержания биогенных и органических веществ, появление слоя с дефицитом кислорода и наличие сероводорода в придонных слоях в межень.

2. После зарегулирования общее таксономическое разнообразие фитопланктона увеличилось от 78 видов в 2002 г. до 108 в 2005 г. В структуре фитопланктона Юмагузинского водохранилища, как и в р. Белая, преобладали зеленые и диатомовые водоросли.

3. Численность фитопланктона после зарегулирования увеличилась в 8 раз, биомасса – в 6 раз, содержание хлорофилла – в 3 раза, интенсивность фотосинтеза – в 3,5 раза. Максимальные показатели зафиксированы на третий и четвертый год существования водохранилища, что соответствовало классической «вспышке трофии».

4. Интегральная первичная продукция возросла в 5 раз в первый год существования водохранилища и оставалась высокой в последующие годы. Отрицательная направленность баланса ОВ (преобладание деструкции над первичной продукцией) свидетельствует о гетеротрофном характере функционирования экосистемы водохранилища.

5. Величина максимального фотосинтеза фитопланктона Юмагузинского водохранилища составляет 0.40 мгС/(л сут), глубина расположения максимума вертикального профиля фотосинтеза определяется развитием фитопланктона, его обеспеченностью световой энергией и биогенным питанием.

6. Величины суточных ассимиляционных чисел (65 ± 20 мгС/мгХл сут) и содержание хлорофилла в единице биомассы ($0,24 \pm 0,03\%$) свидетельствуют о нормальном функционировании фитопланктона водохранилища.

7. Зависимость развития и фотосинтеза фитопланктона Юмагузинского водохранилища от факторов среды носит сложный характер. Наибольшее количество корреляционных связей выявлено в межень 2006 г. и свидетельствует о том, что в период «вспышки трофии» фитопланктон был наиболее требовательным к условиям среды.

8. Водоохранилище горного типа в первые годы существования проходит те же этапы становления, что и равнинные водохранилища, включая классическую «вспышку трофии». С созданием водохранилища трофический статус водотока р. Белая сменился от мезотрофного к эвтрофному. Качество воды варьировало между II и III классами: от «чистой» до «удовлетворительной чистоты».

Список работ по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Мухутдинов В.Ф., Пашкевич А.И. Эффективность трех методов подготовки проб фитопланктона к определению концентрации хлорофилла // Гидробиол. журн. 1987. Т. 23, № 1. С. 89–91.

2. Мухутдинов В.Ф., Попов А.Н., Павлюк Т.Е. Качество воды р. Белая в створе Юмагузинского водохранилища до и после зарегулирования. Изменение солевого состава, биогенных и органических веществ // Водное хозяйство России. 2007. № 6. С. 57–78.

3. Мухутдинов В.Ф., Попов А.Н., Павлюк Т.Е. Качество воды р.Белая в створе Юмагузинского водохранилища до и после зарегулирования. Кислородный режим // Водное хозяйство России. 2008. № 1. С. 27–36.

4. Мухутдинов В.Ф., Бутакова Е.А. Фитопланктон, хлорофилл «а» и первичная продукция р. Белая и их трансформация после зарегулирования // Водное хозяйство России. 2008. № 6. С. 47–70.

5. Мухутдинов В.Ф., Бутакова Е.А. Продукционные характеристики фитопланктона в первые годы существования Юмагузинского водохранилища // Биология внутренних вод. 2012. № 4. С. 25–30.

Список работ, опубликованных по теме диссертации в других изданиях

6. Мухутдинов В.Ф., Бутакова Е.А. Состояние фитопланктона и концентрация хлорофилла «а» верхнего течения р. Белая // Современные аспекты экологии и экологического образования. Казань, 2005. С. 200–201.

7. Павлюк Т.Е., Мухутдинов В.Ф., Бутакова Е.А., Мельников С.Ю. Экологическое состояние верхнего течения р. Белая // Современные аспекты экологии и экологического образования. Казань, 2005. С. 272–274.

8. Мухутдинов В.Ф., Бутакова Е.А., Павлюк Т.Е. Фитопланктон, хлорофилл и первичная продукция Юмагузинского водохранилища в первые годы его существования // Тез. докл. IX Съезд Гидробиологического общества при РАН. Т. 2. Тольятти. 2006. С. 49.

9. Мухутдинов В.Ф. Расчет биомассы фитопланктона в верхнем течении р. Белая по концентрации хлорофилла «а» и эколого-санитарная оценка качества воды // Экологические аспекты сохранения биологического разнообразия национального парка «Башкирия» и других территорий Южного Урала. Уфа, 2007. С. 91–93.

10. Мухутдинов В.Ф., Бутакова Е.А. Продукционные характеристики фитопланктона в первые годы существования Юмагузинского водохранилища // Тез. докл. 4-й Международной научной конференции, посвященной памяти профессора Г.Г. Винберга. СПб. 2010. С. 129.

11. Мухутдинов В.Ф. Формирование фитопланктона Юмагузинского водохранилища и «цветение» в первые годы после зарегулирования // Теоретические проблемы экологии и эволюции. Теория ареалов: виды, сообщества, экосистемы. V Любимцевские чтения. Тольятти. 2010. С. 120–125.

12. Мухутдинов В.Ф. К вопросу о формировании гидрохимического режима водохранилища руслового типа в первые годы его становления (на примере Юмагузинского водохранилища) // Чистая вода России: Сборник материалов XI Международного научно-практического симпозиума. Екатеринбург. 2011. С. 88–91.

Подписано в печать: 20.08.2013 г. Формат 60*84 1/16
Усл. печ. л. 1,0. Бумага "Гознак". Тираж 100 экз. Заказ № 25000
Отпечатано в копировальном центре "Таймер"
620075, г. Екатеринбург, ул. Луначарского, 136.