

На правах рукописи



ПОНОМАРЕВА Юлия Андреевна

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА
ПОТАМОФИТОПЛАНКТОНА РЕКИ ЕНИСЕЙ
В НИЖНЕМ БЬЕФЕ КРАСНОЯРСКОЙ ГЭС

03.02.10 – Гидробиология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Красноярск – 2015

Работа выполнена на кафедре водных и наземных экосистем в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» и ФГБУН «Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук».

Научные руководители:

доктор биологических наук, **Щур Людмила Александровна**

доктор биологических наук, доцент, **Иванова Елена Анатольевна**

Официальные оппоненты:

Баженова Ольга Прокопьевна, доктор биологических наук, ФГБОУ ВПО «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина», кафедра экологии, природопользования и биологии, профессор

Зотина Татьяна Анатольевна, кандидат биологических наук, доцент, ФГБУН «Институт биофизики СО РАН», лаборатория радиоэкологии, старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук», г. Барнаул

Защита состоится «03» апреля 2015 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.15 при ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660041, г. Красноярск, проспект Свободный, 79, ауд. Р 8-06.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета [www. sfu-kras.ru](http://www.sfu-kras.ru)

Автореферат разослан «__» марта 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гаевский Николай Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Исследование состояния водных экосистем в настоящее время является одной из важнейших проблем современности. От изучения экологических основ природопользования, анализа и прогноза изменений в биоте, охраны водных объектов, а так же от объективного контроля за состоянием экосистемы и качеством воды зависит устойчивое развитие и экономический рост России (Указ Президента РФ от 01.04.1996).

Река Енисей, в районе города Красноярска, является источником водоснабжения. Реконструкция гидростроительством и интенсивное комплексное использование крупнейшей водной артерии Сибири привели к необходимости планирования мероприятий по рациональной эксплуатации и сохранению экологического равновесия реки, а также к разработке подходов и критериев оценки её состояния. Для достижения этого в первую очередь необходимо определить реакцию биоты водных экосистем на влияние разнообразных факторов окружающей среды, в том числе и потамофитопланктона, как основного компонента гидроэкосистемы.

Потамофитопланктон (сообщество фитопланктона в реках с быстрым течением) определяет биологическую продуктивность и качество воды водотока и является важным звеном процесса самоочищения водоема (Саут, Уиттик, 1990; Бульон, 1994). Одним из приоритетных направлений в настоящее время остается оценка структуры потамофитопланктона, которая отражает не только особенности естественно-исторического развития и генофонд определенного района, но и позволяет установить специфику влияния основных абиотических факторов на водоросли и проследить последовательность отдельных стадий эволюции гидроэкосистем (Трифоновна, 1990). Особенно это важно при изучении фитопланктона рек, где происходят сложные процессы перемешивания, седиментации взвесей, физико-химической и биологической сорбции токсикантов и множество других ещё мало изученных процессов (Брагинский, 2005).

Принято считать, что в условиях высоких скоростей течения, фитопланктон развивается слабо или не развивается вовсе, и представляет собой смесь видов фитоперифитона и аллохтонных водорослей, в том числе и видов фитопланктона водохранилища, сбрасываемых из верхнего бьефа ГЭС. Поэтому познание закономерностей трансформации видовой структуры потамофитопланктона в процессе экзогенной сукцессии, происходящей при зарегулировании стока реки и образовании водохранилищ, в настоящее время может способствовать дальнейшему развитию представлений об изменении водных сообществ (Охупкин, 1995). Кроме этого, систематический гидробиологический учет характеристик потамофитопланктона в совокупности с гидрохимическими и гидрофизическими показателями дают возможность устанавливать степень загрязнения водоисточника и управлять режимом работы сооружений водоподготовки (Курейшевич и др., 2001).

Цель работы и задачи исследования. Цель работы – изучение структурных характеристик потамофитопланктона и закономерности его временной динамики в р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС (водозабор «Гремячий Лог»).

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Получить и проанализировать современные данные по гидрохимии изучаемого участка р. Енисей;
2. Выявить современный таксономический состав и провести сравнительно-исторический и эколого-географический анализы водорослей планктона;
3. Изучить сезонную и межгодовую динамику структурных характеристик потамофитопланктона;
4. Определить закономерности изменения структурных характеристик потамофитопланктона в градиенте абиотических факторов;
5. Оценить качество воды и трофический статус изучаемого участка р. Енисей.

Научная новизна. Впервые в ходе круглогодичных суточных наблюдений изучены межгодовая и сезонная динамика численности и биомассы потамофитопланктона, выявлены доминирующие комплексы, факторы среды, определяющие структуру и динамику фито-

планктона р. Енисей нижнего бьефа в районе, расположенном в 40 км от плотины Красноярской ГЭС. Показано, что изменение гидрологического режима крупной реки, обусловленное строительством Красноярской ГЭС, повлияло на видовой состав фитопланктона и смену доминирующих видов. Оценено качество воды исследуемого участка реки Енисей по индексу сапробности сообществ потамофитопланктона. Определен трофический статус изучаемого участка реки.

Практическая значимость. Полученные данные по структуре и плотности фитопланктона реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС в настоящее время используются в экологическом контроле за состоянием качества воды в районе водозабора; в регулировании и контроле ввода реагентов, применяемых при обработке воды на фильтровально-очистных сооружениях водозабора «Гремячий Лог» г. Красноярск. Результаты исследования могут быть использованы при проведении экологического мониторинга, прогнозирования возможных изменений в структуре альгоценозов р. Енисей.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

1. В историческом аспекте, от 70-х годов XX века к настоящему времени произошла перестройка флористического состава и экологических групп потамофитопланктона нижнего бьефа Красноярской ГЭС: в снижении доли вклада в биомассу потамофитопланктона планктонными водорослями от 70-100 % до 49 %; от преобладания в доминирующем комплексе видов диатомовых водорослей класса Pennatophyceae (*Cymbella ventricosa* Kutz., *Diatoma elongatum* (Lyngb.) Ag., *Navicula radiosa* Kutz., *Synedra ulna* (Nitzsch.) Ehr.) к преобладанию видов из класса Centrophyceae (*Aulacoseira islandica* (O. Mull.) Sim. и *Cyclotella radiosa* (Grun.) Lemm.); отдельные виды сохранили постоянство в комплексе доминантов (*Diatoma vulgare* Bory и *Hannaea arcus* (Ehrb.) Patr. – в ранневесеннем, *Asterionella formosa* Hass. и *Fragilaria crotonensis* Kitt. – в позднелетнем периодах).

2. Высокая скорость течения реки и низкие температуры воды обуславливают относительное постоянство структуры и динамики потамофитопланктона, а именно: основу его численности и биомассы составляют мелкоклеточные группы водорослей – нанофитопланктон (2-20 мкм) и микрофитопланктон (20-64 мкм); сезонная динамика ежегодно характеризуется одним летним пиком численности и биомассы.

3. Несмотря на известное отрицательное влияние высоких скоростей течения на планктон, в толще воды изучаемого участка р. Енисей живые водоросли преобладают над мертвыми, что свидетельствует о способности некоторых видов размножаться в речных условиях. Подтверждением этого является ежегодное увеличение доли живых водорослей в летний период (в июне).

Апробация работы и публикации. Основные положения и материалы диссертации доложены и обсуждены на VI Всесибирском конгрессе женщин-математиков (Красноярск, январь 2010 г.); V Всероссийской Конференции «Флора растительности Сибири и Дальнего Востока» (Красноярск, май 2011 г.), VII Международной конференции «Реки Сибири (и Дальнего Востока)» (Хабаровск, май 2012 г.); VIII конференции, посвященной Международному дню водных ресурсов (Красноярск, март 2013 г.), IX конференции, посвященной Международному дню водных ресурсов (Красноярск, март 2014 г.), а также на четырех конференциях студентов и молодых ученых (Новосибирск, 2010, 2011 гг., Омск, 2012 г., Борок, 2014 г.), XI съезде ГБО РАН (Красноярск, сентябрь 2014 г.).

Результаты работы представлены в 15-ти печатных работах, из которых 5 статей опубликованы в рецензируемых журналах, 10 материалов конференций и тезисов.

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в планировании исследований, сборе и обработке проб потамофитопланктона, в обработке и анализе данных по химическому составу реки Енисей.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научным руководителям д.б.н. Л.А. Щур, способствующей формированию конкретных представлений в области экологии пресноводного фитопланктона и способов анализа полученных данных на начальном этапе работы, и д.б.н. Е.А. Ивановой за ценные советы по общим направлениям исследова-

ния; а также д.ф.-м.н. Н.Я. Шапареву, д.б.н. В.В. Заворуеву и к.б.н. А. В. Андриановой за поддержку и помощь при написании диссертации; начальнику Центра контроля качества воды О.В. Мироновой и начальнику технологической лаборатории фильтровально-очистных сооружений Центра контроля качества воды С.П. Лужбиной, которые поддержали и обеспечили практическую реализацию научной работы. Автор благодарен сотрудникам технологической лаборатории фильтровально-очистных сооружений и физико-химической лаборатории ЦККВ ООО «КрасКом», принимавшим участие в выполнении различных этапов данной работы.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, выводов, приложения и списка литературы. Работа изложена на 152 страницах, содержит 33 рисунка и 19 таблиц. Библиография насчитывает 212 источников, из них 162 отечественных и 50 иностранных.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ дано обоснование темы диссертации, ее научная новизна, определена практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследования.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ: ПОТАМОФИТОПЛАНКТОН В ЭКОСИСТЕМЕ РЕКИ

Обзор литературы посвящен особенностям формирования фитопланктона и их роли в реках с быстрым течением. Дано определение понятия «потамофитопланктон». Показана положительная и отрицательная стороны развития водорослей в водоеме. Рассмотрено влияние физико-химических факторов на распространение фитопланктона в толще воды. Анализируется роль водорослей в оценке состояния водных экосистем методами биоиндикации. В хронологическом порядке представлены литературные данные по истории изучения водорослей р. Енисей (Усачев, 1928; Грезе, 1953, 1957; Кузьмина, 1973; Чайковская, 1972, 1973, 1974, 1975 а, 1975 б; Левадная, 1975; Чайковская, 1977; Левадная, 1977; Чайковская, 1977; Левадная, Чайковская, Науменко, 1980; Баженова, 1991; Продукционно-гидробиологические..., 1993).

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал и методы исследований. Материалом для настоящей работы послужили результаты четырехлетних натурных ежесуточных исследований потамофитопланктона, проведенных в 2008–2011 гг. на р. Енисей в районе водозабора «Гремячий Лог» (55°98' с.ш. 92°78' в.д.). Данный участок служит источником питьевого водоснабжения г. Красноярск и расположен в 40 км ниже плотины Красноярской ГЭС (рис. 1).

Сбор и обработка материала осуществлялись стандартными гидробиологическими методами (Вельдре, 1963; Киселев, 1969; Кольцова и др., 1971; Федоров, 1979; Рекомендации..., 1991). Фиксацию отобранного материала не проводили. Изучению подвергался живой материал сразу же после его отбора. Инвентаризацию водорослей проводили по отечественным и зарубежным определителям (Определитель пресноводных..., 1951-1986; Кондратьева, 1968; Popovsky, Pfiester, 1990; Ettl, 1983; Атлас доминирующих..., 1985; Starmach, 1985; Krammer, Lange-Bertalot, 1986, 1988, 1991).

Физиологическое состояние клеток фитопланктона определяли с использованием люминесцентного микроскопа «МИКМЕД-2». По размерам клетки водорослей дифференцировали согласно (Reynolds, 1984). Степень сложности фитопланктонного сообщества определяли, рассчитывая индекс видового разнообразия Шеннона. Для сопоставления видового состава в различные годы рассчитан коэффициент флористического сходства Серенсена (Методики изучения..., 1975; Песенко, 1982; Зайцев, 1984). Принадлежность водорослей к различным условиям существования (местообитание, распространение, галобность, отношение к рН, сапробность) определяли согласно (Hancock, 1973; Maillard, 1977; Барина и др., 2006).

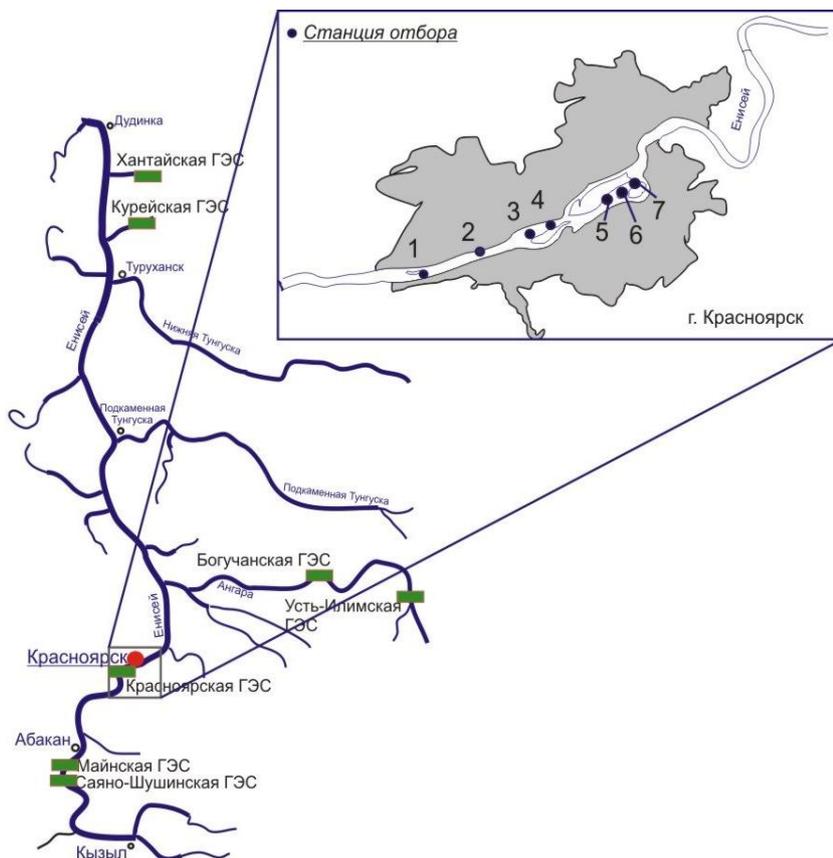


Рисунок 1 – Карта-схема р. Енисей

оценке качества воды использовали предельно допустимые концентрации (ПДК), нормируемые для вод как хозяйственно-бытового (Гигиенические нормативы..., 2007), так и рыбохозяйственного значения (Приказ федерального агентства ..., 2010).

Ежедневные данные скорости сброса воды через плотину Красноярской ГЭС и уровня воды в Красноярском водохранилище (за период 2008-2011 гг.) любезно предоставлены Енисейским бассейновым водным управлением.

Статистическую обработку данных проводили с использованием стандартных компьютерных программ (Statistica 6.0 (StatSoft, Inc.) и Microsoft Excel). Использовали методы корреляционного и однофакторного дисперсионного анализов. Критерии Стьюдента и Фишера применяли для нахождения достоверности различий между арифметическими средними (Плохинский, 1970; Лакин, 1980) Для анализа влияния комплекса физико-химических факторов на показатели развития фитопланктона проводили корреляционный анализ. Во всех случаях нулевую гипотезу отклоняли при $p \leq 0,05$.

Объем выполненных работ за период ежедневных круглогодичных наблюдений с 2008 по 2011 гг. в нижнем бьефе Красноярской ГЭС представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Объем обработанного материала по годам

Исследуемые характеристики	Количество проб				
	2008	2009	2010	2011	Всего
Численность фитопланктона	303	321	314	311	1265
Биомасса фитопланктона	60	107	98	102	383
Гидрохимические и органолептические показатели	2569	2730	2713	2677	10689

По частоте встречаемости водоросли исследуемого участка р. Енисей подразделяли на: наиболее часто встречающиеся (более 50 %), часто встречающиеся (20-50 %), редкие (1-20 %) и единичные (менее 1 %). К категории доминирующих относили виды, составляющие 50-100 % от общей биомассы потамофитопланктона, к субдоминантам – составляющие в отдельные периоды 20-50 %.

Степень загрязнения, классы качества воды и уровень трофности реки определяли в соответствии с (Жукинский и др., 1981; Оксюк и др., 1993; РД 52.24.309-2011).

Химические исследования проводили согласно нормативным документам и методикам выполнения измерений. В качестве критериев при

Природные условия района исследования. Опираясь на литературные источники, приводится описание физико-географических и гидрологических особенностей р. Енисей. Река Енисей на исследуемом нами участке представляет горную, быстротекущую реку (скорость течения 1,8-2,0 м/с). Морфометрические особенности вышележащего Красноярского водохранилища и глубина водозаборных отверстий обуславливают в нижнем бьефе Красноярской ГЭС понижение температуры воды летом и повышение осенью и зимой (Космаков, 2001). Температура воды в период исследования составляла 1,86-14,00 °С. Поступление в зимний период из водохранилища воды с более высокой температурой приводит к образованию незамерзающей полыньи длиной 50-200 км (Ресурсы... , 1973). Колебания уровня воды в реке значительно зависят от режима работы Красноярской ГЭС.

По гидрохимическому анализу, проведенному на основе собственных четырехлетних данных, вода р. Енисей в районе исследования по соотношению ионов относится к гидрокарбонатному классу, к группе кальция, мягкая и характеризуется невысокой минерализацией (59,40-117,00 мг/л), слабощелочной реакцией среды (7,59–7,70), мутностью от 0,74 до 1,96 мг/л, цветностью – 6,80-11,74 градусов, благополучным кислородным режимом (9,30-14,00 мг O₂/л). Концентрации биогенных элементов исследуемого участка реки низкие. Концентрации N-NH₄ и N-NO₃ составляют 0,02-0,16 и 0,55-0,98 мг/л соответственно. Содержание N-NO₂ чаще всего аналитически не регистрировалось. Концентрации фосфатов (PO₄) изменялись от аналитического нуля до 20 мкг/л, фосфора общего (P_{общ}) – от аналитического нуля до 32 мкг/л; кремния – от 1,49 до 3,24 мг/л.

Из общей выборки результатов исследований по металлам особое внимание уделено общему содержанию железа, меди, цинка и марганца, поскольку данные показатели имели значения близкие, либо выше ПДК рыбохозяйственных водоемов (рис. 2).

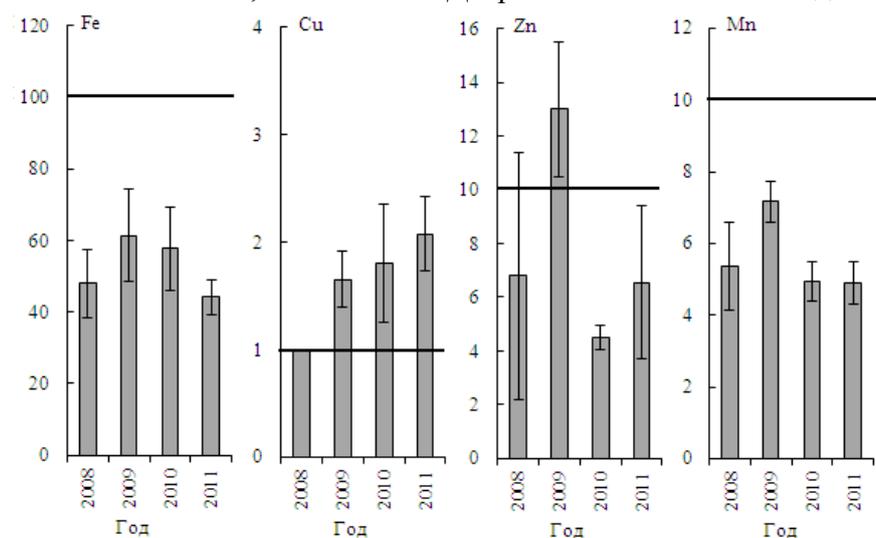


Рисунок 2 – Содержание металлов (мкг/л) в р. Енисей (нижний бьеф Красноярской ГЭС) с указанием границы ПДК для рыбохозяйственных водоемов

За период наблюдений содержание железа, марганца не выходило за пределы ПДК. Концентрации меди и цинка превышали ПДК для воды рыбохозяйственного значения. Содержание таких элементов, как кадмий, никель, молибден, свинец, алюминий, ртуть, мышьяк и хром по материалам за 2008-2011 гг. в 40 км от Красноярской ГЭС аналитически не обнаруживалось. Содержание органических веществ по бихроматной окисляемости в нижнем бьефе Красноярской ГЭС за

период наблюдений изменялось от 5,20 до 10,60 мгO₂/л. В межгодовом аспекте отмечена довольно-таки значительная динамика величин БПК₅: от 0,70 мг O₂/л до 3,00 мгO₂/л. Присутствие в воде СПАВ аналитически не обнаружено. Концентрация фенолов составляет 0,0007 ± 0,0001 мг/л, нефтепродуктов – 0,0100 ± 0,0008 мг/л.

ГЛАВА 3. ФЛОРИСТИЧЕСКИЕ, МЕЖГОДОВЫЕ И СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОТАМОФИТОПЛАНКТОНА РЕКИ ЕНИСЕЙ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ КРАСНОЯРСКОЙ ГЭС

Эколого-флористическая характеристика потамофитопланктона и биология доминирующих видов. Рассмотрена пространственная динамика видового состава и числен-

ности основных систематических групп потамофитопланктона р. Енисей в районе г. Красноярск. На основе сравнения качественных и количественных показателей фитопланктона семи станций, расположенных вдоль русла реки, установлено, что потамофитопланктон характеризовался относительным постоянством, а различия в структуре альгоценоза определяли виды, встречающиеся эпизодически и в небольшом количестве. Это позволило проводить многолетние детальные исследования потамофитопланктона, используя одну станцию (2 – водозабор «Гремячий Лог»), которая выступала в качестве реперной, где при частом отборе проб (посуточно) с высокой степенью достоверности удалось выявить закономерности долговременных изменений, изучить организацию планктонного альгоценоза, сезонную сукцессию и межгодовые вариации.

Проанализирован таксономический состав потамофитопланктона (далее как синоним, фитопланктон) реперной станции, при изучении которого учитывались все виды водорослей, встречающиеся в толще воды, с последующим подразделением их на планктонные водоросли пелагиали и литорали, бентосные формы и эпибионты. Всего в потамофитопланктоне реки с 2008 по 2011 гг. обнаружено 99 таксонов водорослей ниже рода, относящихся к 6 отделам, 8 классам, 15 порядкам, 28 семействам и 47 родам. Особую роль в формировании фитоценоза исследуемого участка реки на протяжении четырех лет наблюдений играли диатомовые (65 таксонов рангом ниже рода) и зеленые (22) водоросли. Отделы цианобактерии (8), динофитовые (2), золотистые (1) и криптофитовые (1) немногочисленны и характеризовались небольшим видовым разнообразием (табл. 2). Преобладание в структуре фитопланктона диатомовых водорослей характерно для другой крупной реки Сибири – Оби (Науменко, 1996), но не для р. Иртыш, где особую роль в структуре играют цианобактерии (Баженова, 2005).

Таблица 2 – Таксономическая структура потамофитопланктона р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС, 2008-2011 гг.

Отдел	Количество					% от общего числа видов
	Классов	Порядков	Семейств	Родов	Видов	
Cyanobacteria	2	3	6	6	8	8
Bacillariophyta	2	5	9	22	65	66
Chlorophyta	1	4	10	16	22	22
Dinophyta	1	1	1	1	2	2
Cryptophyta	1	1	1	1	1	1
Chrysophyta	1	1	1	1	1	1
<i>Всего:</i>	8	15	28	47	99	100

В межгодовой динамике существенных изменений в соотношении обилия водорослей основных систематических групп не выявлено, что подтверждалось высокими коэффициентами флористического сходства (КФС), которые изменялись от: 60 % (для 2008-2009 гг.) до 87 % (для 2009-2010 гг.).

Условия обитания водорослей, обусловленные географическим положением исследуемого участка реки Енисей, определили порядок расположения ключевого спектра семейств по числу зарегистрированных таксонов. Среди ведущих по разнообразию таксонов водорослей рангом ниже рода выделяются семейства *Naviculaceae* (30 видов), *Fragilariaceae* (11), *Achnantheae* (6), *Stephanodiscaceae* и *Nitzschiaceae* (по 5) из отдела диатомовых водорослей. К ним относится 57,6 % видов, разновидностей и форм водорослей планктона исследуемого участка реки. В семействе *Naviculaceae* большинство представителей – бентосные формы (57 % от числа видов с известной экологией). Второе семейство наполовину представлено планктонными организмами (50 %). Третье семейство состоит главным образом из обитателей обрастаний (83 %), четвертое – планктеров (100 %), пятое – обитателей литорали (75 %).

В число часто встречающихся, с частотой встречаемости более 50 %, входят широко распространенные планктонные виды: *C. radiosa*, *F. crotonensis*, *A. formosa* и *D. vulgare*. Стоит так же отметить, что за время исследования шесть видов давали вспышку по частоте встречаемости в отдельные годы: *Achnanthes lanceolata* (Breb.) Grun., *Aulacoseira granulate* (Ehr.) Sim., *Melosira undulate* (Ehr.) Kutz. и *Nitzschia recta* Hantzsch. чаще всего отмечены в 2011 г., *Gomphosphaeria lacustris* Chod. – в 2008 г. Остальные виды имели относительно постоянную частоту встречаемости.

Эколого-географический анализ показал, что 87 видов (88 % от общего количества таксонов рангом ниже рода) являются индикаторами определенных экологических условий: мест обитания, географической приуроченности, степени проточности, минерализации воды, температуры, pH, зон сапробности (табл. 3) (Барина и др., 2000).

Таблица 3 – Распределение числа видов, разновидностей и форм водорослей по эколого-географическим группам в альгофлоре планктона реки Енисей

Категория водорослей	Отделы водорослей						Всего
	Cyanobacteria	Bacillariophyta	Chlorophyta	Dinophyta	Chrysophyta	Cryptophyta	
Местообитание							
Планктонные	1	10	7	2	1	-	21
Бентосные	1	27	1	-	-	-	29
Планктонно-бентосные	3	25	8	-	-	-	36
Неизвестной экологии	3	3	6	-	-	1	13
Распространение							
Космополиты	4	56	14	1	1	-	76
Арктоальпийские	-	3	-	-	-	-	3
Бореальные	-	3	-	-	-	-	3
Малоизученные виды	4	3	8	1	-	1	17
Отношение к pH							
Ацидофилы+ацидобионты	-	2	-	-	-	-	2
Алкалифилы+алкалибионты	-	37	1	-	-	-	38
Индифференты	1	20	4	-	1	-	26
Галобность							
Галофобы	-	3	-	-	-	-	3
Индифференты	2	49	9	1	1	-	62
Галофилы	2	9	1	-	-	-	12
Реофильность							
Стоячие	-	11	1	-	-	-	12
Стояче-текучие, индифференты	1	16	10	1	1	-	29
Текучие	-	2	-	-	-	-	2

Примечание: «-» – вид не обнаружен

Нами установлено, что в составе водорослей нижнего бьефа Красноярской ГЭС преобладают водоросли смешанного планктонно-бентосного типа местообитаний (36 видов), группа бентосных составляет 29 и планктонных – 21 таксон водорослей ниже рода. У 13 видов водорослей отношение к месту обитания не установлено. Подавляющее большинство зарегистрированных водорослей (76 видов) имеют широкое географическое распространение (относятся к видам-космополитам). Основная часть водорослей представлена обитателями щелочных вод (алкалифилами и алкалибионтами) (58 % от числа видов, разновидностей и форм водорослей с известным значением pH); виды-индифференты составляют 32 %; ацидофилы в районе исследования представлены двумя видами: *A. islandica* и *Tabellaria fenestrata*

(Lyngb.) Kutz. По отношению к степени солености воды альгофлора в основном представлена пресноводными видами – 84 % (из них галофобы – 4 % и индифференты – 81 %) и пресноводно-солонатоводными видами – 16 % (галофилы). Несмотря на то, что в районе исследования реки отмечена высокая скорость течения (до 2 м/с), по отношению к проточности альгофлору р. Енисей в основном формировали водоросли-индифференты (67 %), на долю лимнофильных видов приходилось 28 %.

Поскольку, основные исследования данного участка реки Енисей датируются 70-80-ми годами XX века, то при сборе информации об экологии водорослей привлекались литературные источники, освещающие эту проблему ранее (Кузьмин, Девяткин, 1975; Hancock, 1973; Maillard, 1977). Это позволило установить, что в настоящее время в видовом составе доля собственно планктонных форм (43 %) снизилась по сравнению с исследованиями 1984-1987 гг. (54 %) и практически осталась на уровне исследований 1967-1973 гг. (44 %) (Чайковская, 1972, 1975 б; Продукционно-гидробиологические..., 1993). В составе водорослей р. Енисей в настоящее время преобладают бентосные и перифитонные (обрастатели, литоральные, эпибионтные) формы, составляющие 43 вида (57 % от числа видов с известной экологией). У 24 видов водорослей отношение к месту обитания не установлено.

Во временном аспекте различался и вклад в биомассу потамофитопланктона той или иной экологической группы. Так, в 1967-1970 гг. подавляющую часть среднегодовой биомассы всех водорослей составляли истинно планктонные виды (от 70 до 100 %). После установления в водохранилище постоянного режима в толще воды реки возросла значимость бентосных водорослей, формирующих до 68 % общей биомассы (Чайковская, 1977; Дрюккер и др., 1982). В период 1984-1987 гг. их участие в формировании биомассы фитопланктона снижается до 40 % (Продукционно-гидробиологические..., 1993). В современных условиях на исследуемом створе доля в общей биомассе фитопланктона истинно планктонных водорослей составляет до 49 %.

Высокое видовое разнообразие потамофитопланктона исследуемого участка отмечено в летний и осенний период, низкое – в зимний и весенний. В фитопланктоне р. Енисей наибольшую роль по биомассе играли диатомовые водоросли, характеризующиеся выраженной сезонностью пиков развития отдельных видов, приуроченных к определенным коротким интервалам годового цикла. Четкое представление о сезонной периодичности и распределении популяций массовых видов водорослей (доминантов и субдоминантов) определило понимание динамики общей биомассы фитопланктона. В целом число видов, разновидностей и форм водорослей в пробах в течение года изменялось от 5 до 35.

Зимний период. Зимой видовое разнообразие водорослей крайне низкое и представлено лишь отдельными экземплярами диатомовых водорослей, редко список зимних видов дополняли представители других групп водорослей.

Весенний период. С марта до середины апреля фитопланктон качественно развит слабо. В среднем в каждой пробе регистрировалось от 12 до 14 видов. Видовое разнообразие потамофитопланктона увеличивалось до 27 видов лишь ко второй декаде мая. В весеннем планктоне качественно преобладали диатомовые водоросли. Водоросли из других отделов значительного вклада в видовое разнообразие не вносили, но, несмотря на это дополняли общий список фитопланктона реки. С конца апреля до конца мая к числу массовых видов относились *D. vulgare* и *H. arcus* (Ehr.) Kutz.

Летний период. Большим видовым разнообразием отличался летний фитопланктон, в котором, как и в предшествующие периоды, качественно преобладали диатомовые водоросли, но в тоже время увеличилась частота встречаемости представителей других отделов. К числу массовых видов в этот период относились *A. formosa*, *A. islandica*, *C. radiosa*, *F. crotonensis*. В июне-июле при температуре воды $7,9 \pm 0,4$ °C число видов, разновидностей и форм водорослей в пробах максимально достигало 35. В среднем в пробе отмечено 25-27 видов. В августе, несмотря на повышение температуры воды (в среднем до $10,7 \pm 0,3$ °C) видовое разнообразие снижалось до 20 видов на одну пробу.

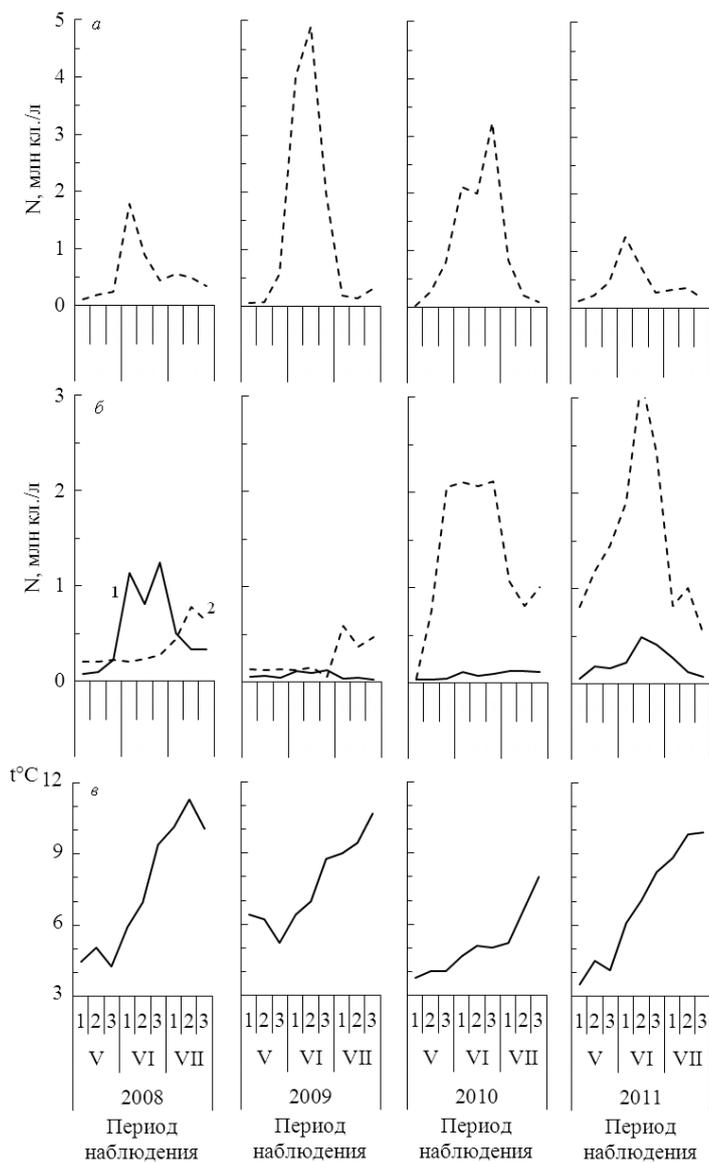


Рисунок 3 – Декадная динамика численности (N, млн.кл./л): а – *Aulacoseira islandica*; б – *Asterionella formosa* (1), *Cyclotella radiosa* (2); в – температуры воды

Вид *A. formosa* встречалась в пробах круглогодично, но массового развития (численность до 1,24 млн. кл./л, биомасса – 0,52 мг/л) получила только в июне 2008 г., в остальные годы этот вид не достигал заметного развития. Вид *A. islandica* – абсолютный доминант летнего фитопланктона. Максимальная численность и биомасса зарегистрированы в июне 2009 г. при температуре воды около 7 °С – до 4,91 млн. кл./л и 12,85 мг/л соответственно (рис. 3). В 2011 г. этот вид встречался в течение короткого периода и разделял лидирующие позиции по биомассе с *C. radiosa*.

По данным Н.А. Кожевниковой (Кожевникова, 2000; Красноярское водохранилище, 2008) в верхнем бьефе Красноярского водохранилища (Приплотинный плес, у плотины) *A. islandica* занимала доминирующее положение в нефотическом холодном слое (гиполимнион). Поскольку, для глубоководного Красноярского водохранилища характерен глубинный сброс воды через плотину (18-40 м), то очевидно, повышение численности *A. islandica* в нижнем бьефе обусловлено сбросом из верхнего бьефа. Далее состояние *A. islandica* в экосистеме реки неоднозначно. Как показали наши исследования, попав из нефотической зоны в фотическую при оптимальной температуре и турбулентности воды, *A. islandica* успевает размножиться в летний период до состояния доминирующего вида. У-

становлено, что в июне, в период интенсивного развития вида в толще воды изучаемого участка р. Енисей, все клетки *A. islandica* были жизнеспособные. Это интересный факт, так как при высоких скоростях течения обычно фитопланктон представляет смесь аллохтонных водорослей верхнего бьефа и перифитонных водорослей.

Вид *C. radiosa* доминант осеннего и один из субдоминантов летнего планктона 2011 г. с численностью до 3,21 млн. кл./л. В этот год *C. radiosa* составляла до 65 % от численности потамофитопланктона (третья декада июня) и до 69 % – от биомассы (вторая декада октября). В 2008 и 2009 гг. *C. radiosa* развивалась слабо. В мае-июне 2010 г. численность составляла 2,02 млн. кл./л. Высокая численность *F. crotonensis* отмечалась в августе 2010 и 2011 гг. с пиком обилия во второй декаде месяца (1000 тыс. кл./л и 855 тыс. кл./л соответственно). В 2008 г. максимальная численность *F. crotonensis* достигала 522 тыс. кл./л, в 2009 г. – численность не превышала 375 тыс. кл./л.

Осенний период. Осенью фитопланктон качественно мало изменился, но частота встречаемости тех или иных видов снизилась. В среднем в пробе регистрировалось 10-14 ви-

дов водорослей. Основная роль в образовании осеннего планктона по-прежнему принадлежала диатомовым водорослям.

Индекс видового разнообразия H_b в течение 2008-2011 гг. изменялся от 0,99 до 2,93 (в среднем $1,90 \pm 0,03$). На исследуемом участке реки пониженные его значения характерны для зимнего (когда структура фитопланктона имела упрощенную структуру) и летнего (когда на фоне качественного богатства количественно доминировал один вид – *A. islandica*) периодов (рис. 4). Высокие H_b получены в весенне-осенний период, когда в структуре фитопланктона четко выраженных доминирующих по биомассе видов (свыше 50 %) не выделялось, а видовая структура альгоценоза имела сложный характер.

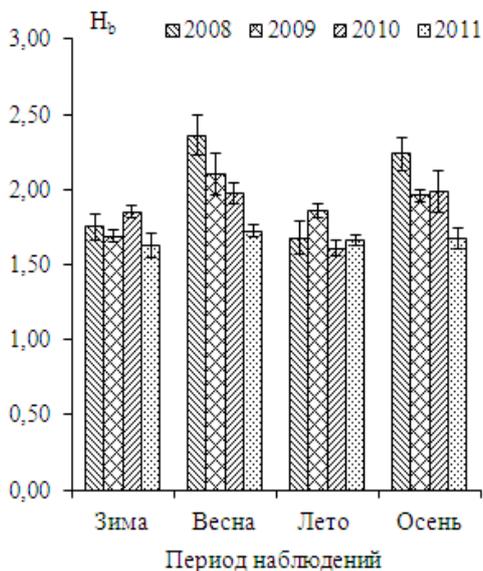


Рисунок 4 – Индекс Шеннона (H_b)

тона четко выраженных доминирующих по биомассе видов (свыше 50 %) не выделялось, а видовая структура альгоценоза имела сложный характер.

Из изменений, коснувшихся качественного состава альгофлоры Верхнего Енисея как до момента зарегулирования в 1967 г. русла в верхнем течении реки, так и после, стоит отметить следующее. Если основу доминирующего комплекса водорослей поздней весной в 2008-2011 гг. составляли *D. vulgare* и *H. arcus*, то в 1984 г. – систематически в нем присутствовали *C. ventricosa* и *Cryptomonas sp.* (Продукционно-гидробиологические..., 1993). В настоящее время летний пик увеличения биомассы фитопланктона связан с массовым развитием *A. islandica* и *C. radiosa*, а не с *A. formosa*, *Asterionella gracillima* (Hantzsch.) Heib., *Melosira granulata* var. *granulate* (Ehr.) Ralfs et var. *angustissima* (O. Mull). Hust., как в июне-июле 1974 г., на что указывала Т.С. Чайковская (1977). А.Д. Приймаченко (Продукционно-гидробиологические..., 1993) по результатам исследо-

ваний 1984-1987 гг. среди летних доминирующих по биомассе водорослей отмечала совершенно иные виды – *C. ventricosa*, *Diatoma elongatum* (Lyngb.) Ag., *Navicula radiosa* Kutz., *A. granulata* (Ehr.) Sim., *S. ulna*. Зеленая водоросль *Ulothrix zonata* (Web. Et Mohr) Kutz., встречающаяся раньше в толще воды р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС практически в течение всего года, теперь в планктоне регистрируется единично во второй половине мая. Однако этот вид в значительном количестве развивается с апреля по июль в литоральной зоне реки, обрастая камни (Sushchik et al., 2010). В настоящее время из альгоценоза выпали многие виды диатомовых, зеленых, золотистых и цианобактерий, например, эпифитный вид *Lyngbya kuetzingii f. ucrainica* (Schirsch.) Elenk. В настоящее время совсем не зарегистрированы в фитопланктоне представители отделов Xanthophyta и Euglenophyta (Чайковская, 1972, 1977 а; Продукционно-гидробиологические..., 1993). Сходство в доминирующих комплексах потамофитопланктона нижнего бьефа Красноярской ГЭС состояло в том, что, как и ранее, доминанты *C. radiosa*, *A. formosa*, *F. crotonensis* относятся к наиболее постоянным и ведущим видам для всех лет исследования.

Сезонная и межгодовая динамика численности и биомассы потамофитопланктона. Сезонная динамика количественных показателей фитопланктона нижнего бьефа Красноярской ГЭС показала слабое развитие водорослей зимой и осенью, интенсивное – весной и летом. Динамика структурных показателей внутри года имела вид одновершинной кривой.

Зимой отмечено крайне низкое содержание водорослей, общая численность фитопланктона изменялась в пределах 0,07-0,78 млн. кл./л; биомасса – 0,07-0,92 мг/л. На протяжении весеннего периода общая численность фитопланктона варьировала от 0,16 до 6,01 млн. кл./л, биомасса – 0,14-9,90 мг/л (рис. 5). С марта по апрель структурные показатели фитопланктона имели низкие значения.

Однако с конца апреля до конца мая распределение фитопланктона в нижнем бьефе Красноярской ГЭС имело тенденцию увеличения численности и биомассы, связанную с интенсивным развитием диатомовых водорослей: *D. vulgare* (максимальная численность дости-

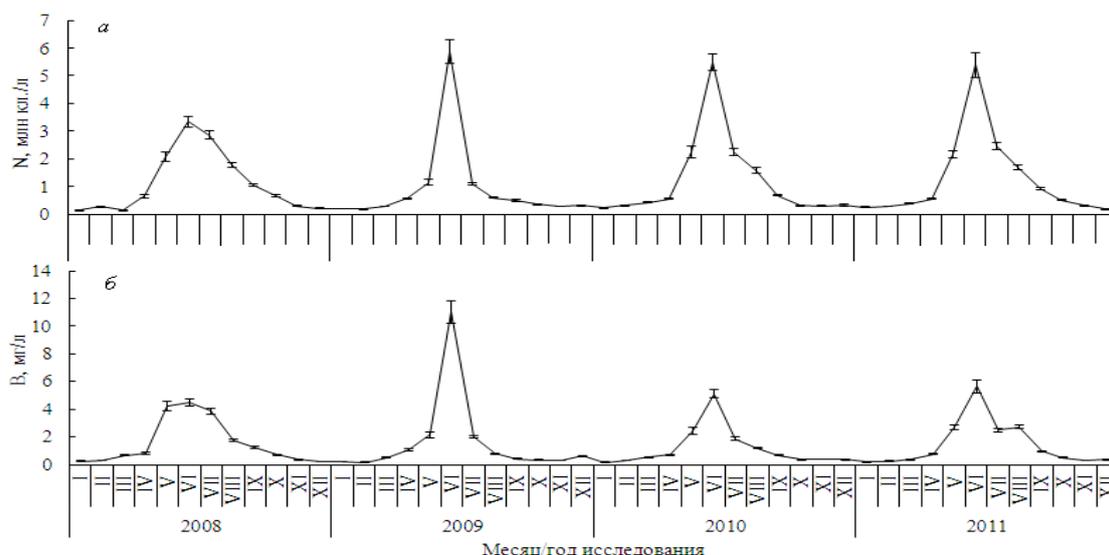


Рисунок 5 – Сезонная и межгодовая динамика численности (а) и биомассы (б) потамофитопланктона в нижнем бьефе Красноярской ГЭС

гала 0,59 млн. кл./л, биомасса 1,49 мг/л) и *H. arcus* (0,30 млн. кл./л и 0,60 мг/л соответственно). В летний период количественные показатели фитопланктона в реке варьировали в большом диапазоне: общая численность в июне-августе изменялась в пределах от 0,28 до 12,25 млн. кл./л, общая биомасса – 0,34-23,00 мг/л. В течение всего июня интенсивно развивалась *A. islandica*, достигая максимального развития в середине месяца, что совпадало с максимальной численностью и биомассой фитопланктона в целом.

Осенью величины структурных показателей фитопланктона снизились, его обилие в нижнем бьефе изменялось в пределах 0,17-1,51 млн. кл./л и 0,19-1,82 мг/л., составляя в среднем за сезон $0,53 \pm 0,02$ млн. кл./л и $0,58 \pm 0,02$ мг/л соответственно (см. рис. 5). Подобный ход развития фитопланктона в нижнем бьефе Красноярской ГЭС наблюдали и ранее (Чайковская, 1977; Кузьмина, 1979; Продукционно-гидробиологические..., 1993). Кроме того, характер развития фитопланктона с одним летним максимумом отмечали в другой сибирской реке Оби (Науменко, 1996). Но такая динамика характерна не для всех рек, например для р. Средний Иртыш, сезонная динамика структурных показателей фитопланктона имела вид двухвершинной кривой с пиками в начале лета и конце лета – начале осени (Баженова, 2005).

В рамках данной работы исследована связь наступления времени максимума биомассы потамофитопланктона от скорости сброса и уровня воды в Красноярском водохранилище (рис. 6). На протяжении четырехлетних наблюдений установлено, что в периоды подъема уровня воды в водохранилище (конец мая – июнь) наблюдалось резкое увеличение биомассы фитопланктона. Хотя достоверной связи между ростом биомассы фитопланктона и максимальными темпами сброса воды из водохранилища не установлено, однако нарастание биомассы потамофитопланктона в 2008 и 2010 гг. совпадает с периодом максимальных скоростей сброса воды, а в 2009 и 2011 гг. рост биомассы приходится на время спада его интенсивности.

Сезонные и годовые изменения количества водорослей обусловлены, прежде всего, интенсивным развитием диатомовых, а затем представителей других отделов водорослей (рис. 7). На долю диатомовых водорослей в зимний период приходилось в среднем 83 % общей численности и 78 % общей биомассы; в весенний – 78 % и 69 %; летний – 84 % и 67 %; осенний – 80 % и 69 % соответственно. Тенденция увеличения общей биомассы фитопланктона и биомассы водорослей основных систематических групп в нижнем бьефе Красноярской ГЭС прослеживалась от весны к лету, с последующим снижением к осенне-зимнему периоду.

Как показал ретроспективный обзор данных (Грезе, 1957; Кузьмина, 1973, 1979; Чайковская, 1977; Продукционно-гидробиологические..., 1993), структура фитопланктона в

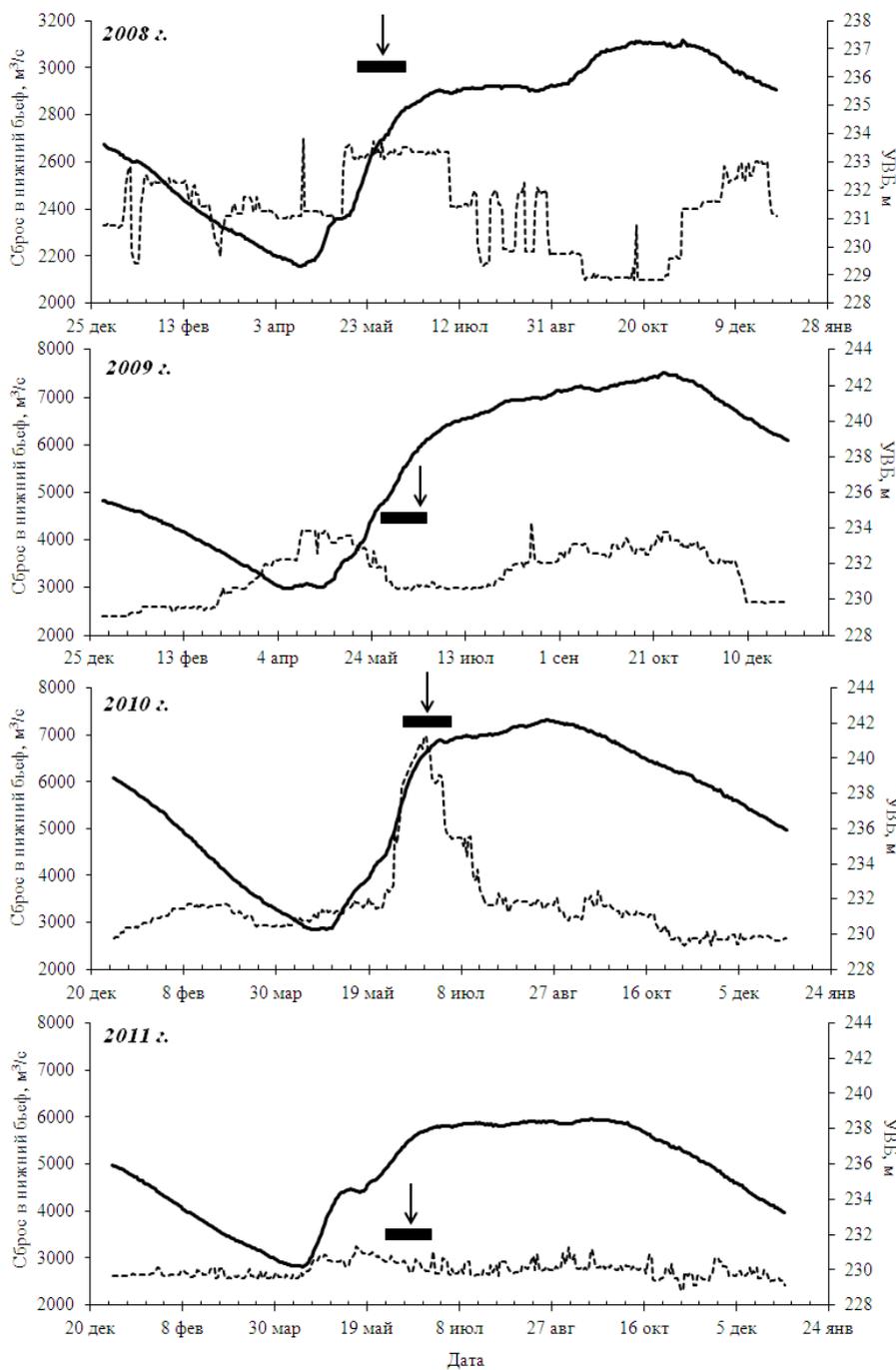


Рисунок 6 – Ежедневная динамика скорости сброса (*курсив*) и уровня воды в водохранилище (*сплошная линия*). Стрелка указывает на период максимальной биомассы потамофитопланктона в нижнем бьефе Красноярской ГЭС

нижнем бьефе начала меняться с 80-х годов XX века (рис. 8). К этому периоду численность увеличилась в среднем в 7 раз, биомасса – в 8 раз. В настоящее время на фоне значительного варьирования минимальных и максимальных значений численности и биомассы фитопланктона резких межгодовых вариаций фитопланктона не установлено. В 2008-2011 гг. по сравнению с 1984-1987 гг. общая численность фитопланктона осталась на прежнем уровне, биомасса увеличилась в 2 раза.

Гидрохимический режим реки как фактор влияния на формирование потамофитопланктона нижнего бьефа Красноярской ГЭС. Для выявления возможной связи между физико-химическими факторами, оказывающими первостепенное значение на альгоценоз реки Енисей, и составом фитопланктона проведен корреляционный анализ. В результате статистического анализа связи общей биомассы фитопланктона с химическим составом речной воды, представленной в виде

корреляционных графов, для 2009-2011 гг. значимых корреляций не обнаружено (рис. 9). За период наблюдения представители из отдела зеленых водорослей образовывали большее количество достоверных статистических связей, цианобактерии и диатомовые – меньшее. В указанный период выявлена сильная и статистически достоверная корреляция общей биомассы фитопланктона и биомассы отдельных групп фитопланктона с ХПК; общей биомассы, биомассы цианобактерий и диатомовых с содержанием меди в воде; биомассы диатомовых, зеленых и прочих с температурой воды.

Неожиданным результатом оказалась связь содержания кремния в воде и биомассы цианобактерий и зеленых водорослей. По мере увеличения кремния в воде увеличивалась их биомасса, вероятно потому, что снижалась доля диатомовых водорослей.

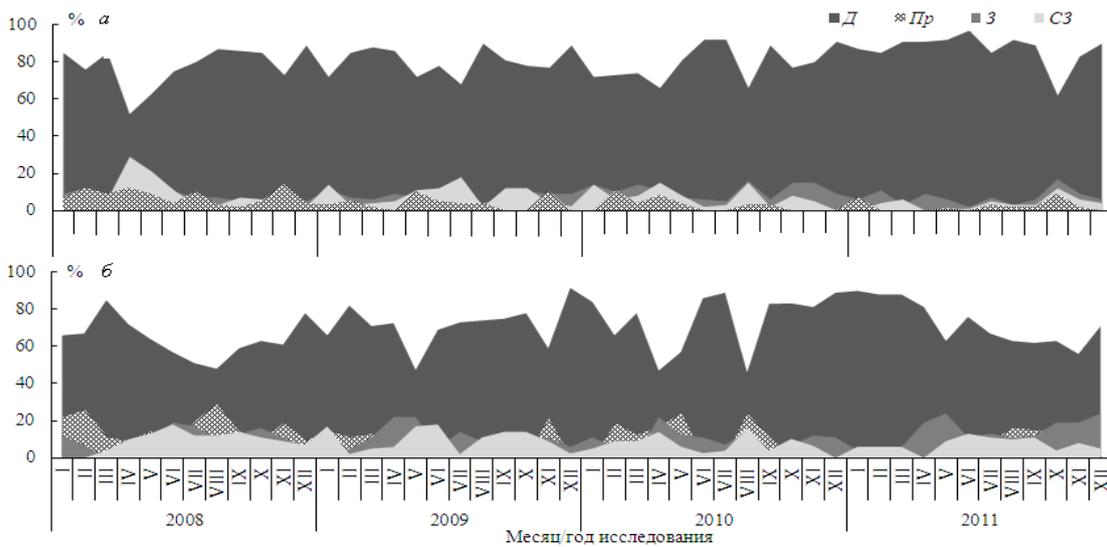


Рисунок 7 – Динамика соотношения численности (а) и биомассы (б) водорослей основных систематических групп. Группы водорослей: Д – диатомовые, З – зеленые, СЗ – цианобактерии, Пр – прочие (динофитовые, золотистые и криптофитовые)

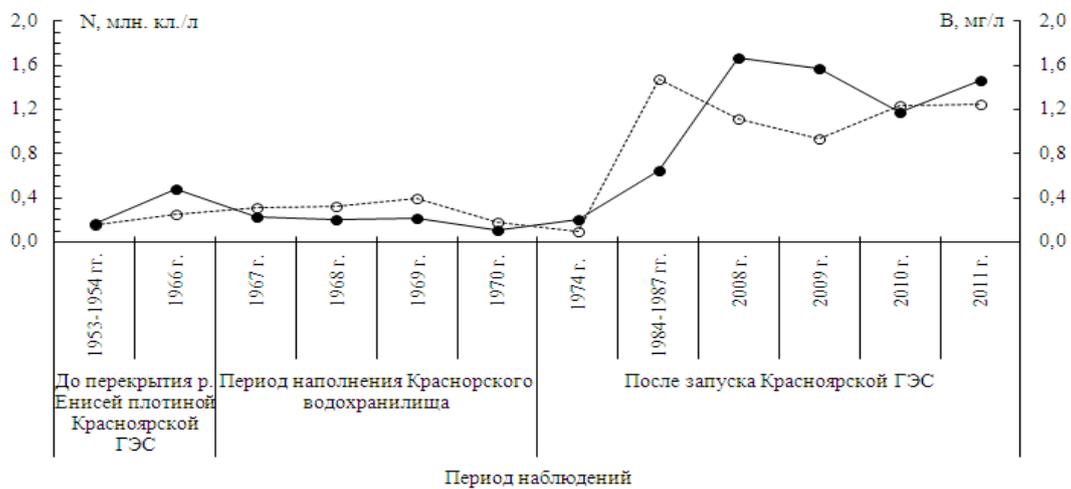


Рисунок 8 – Межгодовая динамика численности (-○- N, млн. кл./л) и биомассы (-●- В, мг/л) фитопланктона в нижнем бьефе Красноярской ГЭС

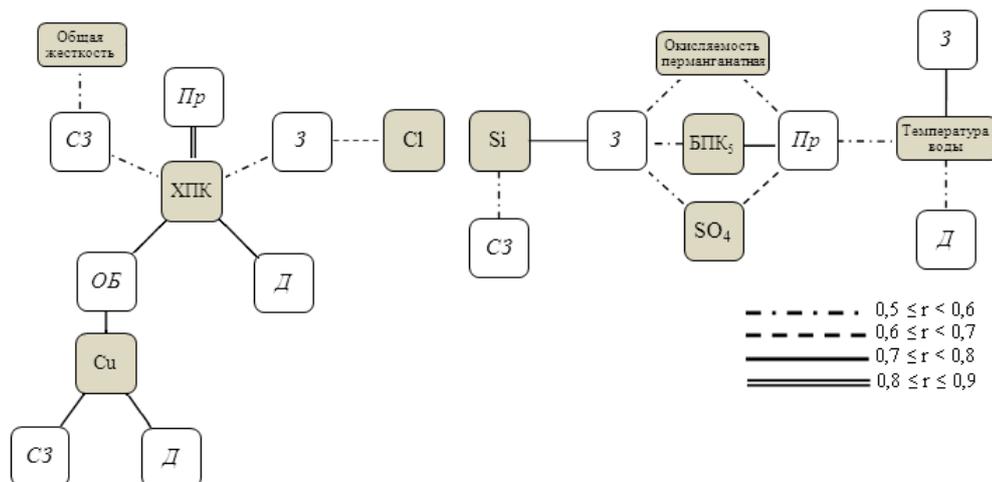


Рисунок 9 – Корреляционные графы связи основных гидрохимических параметров воды с общей биомассой и с биомассой основных систематических групп потамофитопланктона. ОБ – общая биомасса. Группы водорослей: Д – диатомовые, З – зеленые, СЗ – цианобактерии, Пр – прочие (динофитовые, золотистые и криптофитовые)

Статистически достоверные высокие положительные коэффициенты корреляции получены между биомассой зеленых водорослей и «прочих» с сульфатами, БПК₅, перманганатной окисляемостью. Цианобактерии коррелировали с общей жесткостью, зеленые водоросли – с содержанием хлоридов. Таким образом, полученные результаты корреляционного анализа, представленные в виде корреляционных графов, не противоречат биологическому смыслу.

Физиологическое состояние фитопланктона. Одним из важнейших элементов диагностики жизнеспособности клеток водорослей является определение соотношения живых и мертвых клеток, что остается крайне важным при влиянии на альгоценоз реки гидродинамического фактора. Наши исследования показали, что процентное содержание живых клеток в толще воды р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС в течение года превышало количество мертвых, но в разные сезоны оно неодинаково (рис. 10).

Ранее О.П. Баженовой (1988) было установлено, что не все клетки, находящиеся в толще воды р. Енисей, проявляют фотосинтетическую активность. У большого количества этих клеток фотосинтез не регистрировался, даже несмотря на наличие ясно видимого неразрушенного хроматофора.

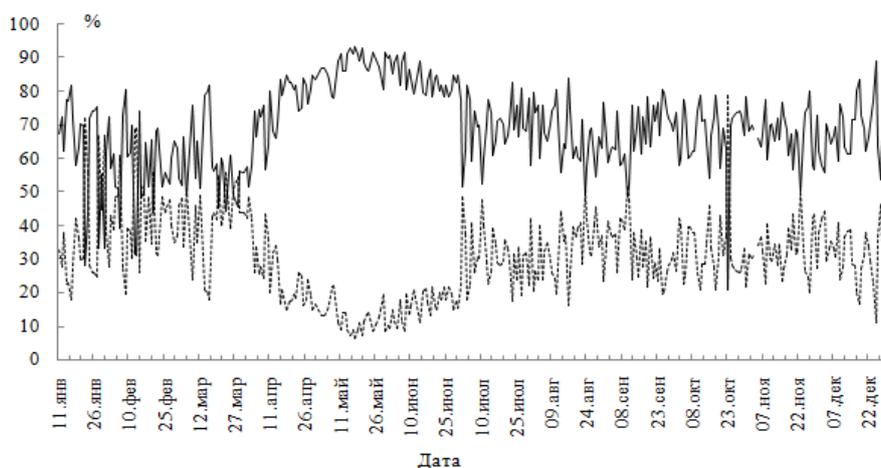


Рисунок 10 – Ежесуточные изменения численности живых (прямая) и мертвых (курсив) клеток потамофитопланктона р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС в 2008-2011 гг. (% от общей численности фитопланктона).

Фотосинтетическую активность в Верхнем Енисее прежде проявляло лишь 10-15 % от общего их числа, в среднем составляя 5-8 %.

В настоящее время в зимний период при слабом развитии фитопланктона и его однообразии во всех пробах наряду с живыми водорослями отмечено заметное количество пустых створок диатомей. Зимой численность мертвых клеток достигала 234 тыс. кл./л (февраль 2010 г.), что

составляло 79 % от общей численности фитопланктона. В зимние месяцы 2008-2011 гг. численность мертвых клеток в среднем составляла $84 \pm 2,81$ тыс. кл./л, что соответствует 36 % от общей численности зимнего фитопланктона.

Весной на фоне возрастающего видового разнообразия потамофитопланктона и его обилия количество живых клеток в толще воды р. Енисей постепенно росло, достигая максимума в мае. На протяжении двух месяцев (с конца апреля по конец июня) количество живых клеток намного превышало таковую мертвых, достигая 96 % от общей численности. Высокая численность живых клеток связана со сроками массового появления в нижнем бьефе представителей диатомовых водорослей: *D. vulgare* и *H. arcus* – в мае и *A. islandica* и *C. radiosa* – в июне. В июле доля живых клеток в толще воды редко превышала 80 % и в среднем составляла 69 %. В августе высокой численности достигла *F. crotonensis*, но в крайне ограниченном количестве ещё встречались доминирующие виды весеннего планктона *D. vulgare* и *H. arcus*, а также холодноводный и теневыносливый вид *A. islandica*. Но, несмотря на это, в этот период доля живых клеток осталась на уровне июльских значений и в среднем составляла 67 %. Осенью потамофитопланктон качественно мало изменился, но интенсивность его развития снизилась. В сентябре и октябре доминантами были *C. radiosa* и *F. crotonensis*, но их количественные показатели заметно уменьшились по сравнению с предшествующими месяцами, однако это не отразилось на количественном преобладании живых клеток над мертвыми. Осенью в 2008-2011 гг. численность живых клеток потамофитопланктона варьировала в пределах 45-1043 тыс. кл./л, мертвых – 7-734 тыс. кл./л. В осенний пери-

од численность мертвых клеток в среднем за четыре года составила 33 % от общей численности потамофитопланктона.

Таким образом, на основе полученных данных установили, что различия в соотношении численности живых и мертвых клеток в нижнем бьефе Красноярской ГЭС являются отражением сезонной сукцессии видов, которая определяется действием температуры воды, и практически не зависят от других абиотических факторов среды. Доля живых клеток потамофитопланктона практически в течение всего года превосходит долю мертвых. Резкое повышение пика численности живых клеток водорослей в летний период, может являться подтверждением, что доминирующие виды имеют возможность размножаться в речных условиях.

Размерная структура фитопланктона на примере доминирующих видов в потамофитопланктоне р. Енисей в 2008-2011 г. Большинство представителей потамофитопланктона реки относилось к микрофитопланктону (20-64 мкм) (44 % от всех обнаруженных видов) и нанофитопланктону (2-20 мкм) (39 %). Именно эти размерные фракции определяли достаточно высокий уровень количественного развития (рис. 11). Определяющим в биомассе

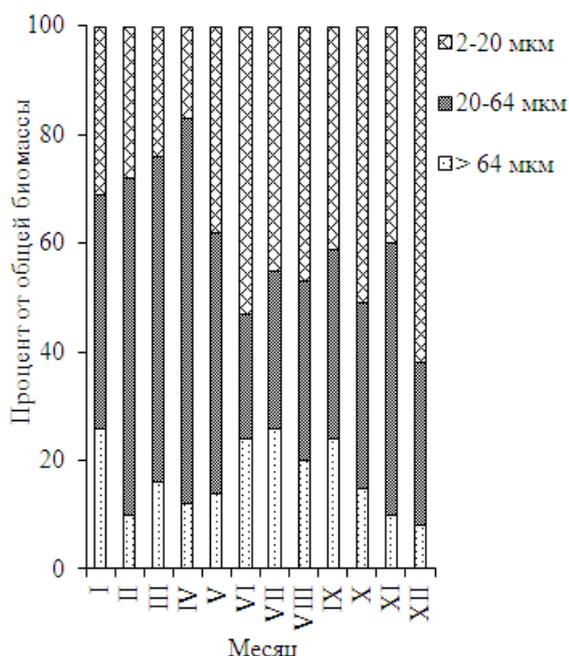


Рисунок 11 – Сезонная динамика вклада водорослей различной размерной фракции (мкм) в общую биомассу потамофитопланктона в 2008-2011 гг.

с января по май в течение четырех лет был микрофитопланктон. Из диатомовых основной вклад в биомассу вносили *C. pediculus*, *Stephanodiscus hantzschii* Grun., *D. vulgare*, представители рр. *Gomphonema* и *Navicula*. В летние месяцы и вплоть до декабря в биомассе доминировали мелкоклеточные виды (за исключением ноября) – в большей степени это доминирующие виды *A. islandica*, *C. radiosa*. Следует сказать, что в летние месяцы в пробах часто встречались клетки с длиной более 64 мкм – *A. formosa*, *F. crotonensis*, *Cymbella stuxbergii* Cl., *Didymosphenia geminata* (Lyngb.) M. Schmidt, *Gomphonema acuminatum* Ehr., *S. ulna*.

На исследуемом участке реки наиболее разнообразно представлены диатомовые водоросли, поэтому для анализа изменения размеров клеток разных лет исследования, выбраны виды отдела Bacillariophyta с частотой встречаемости более 50 % и входящие в доминирующий комплекс: *A. islandica* (28-49 % частоты встречаемости), *C. radiosa* (79-95 %), *D. vulgare* (53-69 %), *F. crotonensis* (48-64 %), *A. formosa* (67-85 %), *H. arcus* (18-28 %). В результате проведенного анализа установили следующее (табл. 4).

Таблица 4 – Распределение средних диаметров створки (мкм) таксонов класса Centrophyceae и длины клетки (мкм) класса Pennatophyceae в р. Енисее в 2008-2011 гг.

Таксоны водорослей	2008	2009	2010	2011
Centrophyceae:	13,9 ± 4,7	12,6 ± 4,7	12,1 ± 3,7	12,9 ± 4,1
<i>Aulacoseira islandica</i>	15,1 ± 1,5	10,5 ± 1,5	12,6 ± 2,5	10,5 ± 2,8
<i>Cyclotella radiosa</i>	10,7 ± 2,2	11,6 ± 2,4	10,7 ± 2,4	13,1 ± 3,1
Pennatophyceae:	62,7 ± 28,6	59,1 ± 30,4	59,6 ± 33,3	56,3 ± 25,4
<i>Asterionella formosa</i>	66,2 ± 8,4	65,3 ± 7,6	66,3 ± 8,3	67,8 ± 8,4
<i>Diatoma vulgare</i>	22,5 ± 4,4	26,2 ± 3,9	21,0 ± 2,0	21,8 ± 2,8
<i>Fragilaria crotonensis</i>	93,6 ± 19,5	85,3 ± 14,0	95,3 ± 16,7	96,7 ± 17,6
<i>Hannaea arcus</i>	55,4 ± 11,3	41,9 ± 7,0	58,2 ± 16,3	67,3 ± 20,4

При сравнении размеров клеток вида *A. islandica* в 2008 г. и 2009-2011 гг. выявлены по критерию Стьюдента достоверные различия в уменьшении диаметра створки ($t_{\text{фак}} = 11,66; 4,54$ и $8,13$ против $t_{\text{ст}} = 2,02$, $p < 0,05$), такая же закономерность прослеживалась и по размерам диаметра створки в 2010 г. и 2011 г. ($t_{\text{фак}} = 3,00$ против $t_{\text{ст}} = 2,00$, $p < 0,05$). Достоверное увеличение диаметра створки диатомовых нитчатых водорослей было обнаружено только для данных 2009 г. и 2010 г. ($t_{\text{фак}} = 3,06$ против $t_{\text{ст}} = 2,02$, $p < 0,05$). Аналогичная тенденция увеличения диаметра створки отмечена и для другой центрической водоросли *C. radiosa*, показаны достоверные различия увеличения диаметра створок с 2008-2010 гг. к 2011 г. (соответственно $t_{\text{фак}} = 4,17; 2,82$ и $4,69$ против $t_{\text{ст}} = 1,99$, $p < 0,05$). Размеры клеток *A. formosa* на протяжении четырех лет наблюдений не имели достоверных отличий между сравниваемыми годами. Длина клеток *F. crotonensis* в 2009 г. имела достоверные отличия в сторону более коротких клеток по сравнению с 2008 ($t_{\text{фак}} = 2,90$ против $t_{\text{ст}} = 1,98$, $p < 0,05$), 2010 ($t_{\text{фак}} = 3,70$ против $t_{\text{ст}} = 1,98$, $p < 0,05$) и 2011 гг. ($t_{\text{фак}} = 4,42$ против $t_{\text{ст}} = 1,97$, $p < 0,05$). Размеры клеток *H. arcus* в 2009 г. также достоверно уменьшались по сравнению с 2008 ($t_{\text{фак}} = 6,05$ против $t_{\text{ст}} = 2,00$, $p < 0,05$), 2010 ($t_{\text{фак}} = 5,65$ против $t_{\text{ст}} = 2,01$, $p < 0,05$) и 2011 гг. ($t_{\text{фак}} = 5,52$ против $t_{\text{ст}} = 2,07$, $p < 0,05$). В 2011 г. размеры *H. arcus* достоверно увеличивались по сравнению с 2008 г. ($t_{\text{фак}} = 2,48$ против $t_{\text{ст}} = 2,05$, $p < 0,05$). Длина клеток *D. vulgare*, напротив, в 2009 г. имела максимальные размеры длины клеток достоверно отличающиеся от всех остальных лет исследования ($t_{\text{фак}} = 3,96$ (2008-2009 гг.), $7,18$ (2009-2010 гг.) и (2009-2011 гг.) против $t_{\text{ст}} = 2,00$, $p < 0,05$).

Таким образом, установлено, что фитопланктон р. Енисей представлен мелкими фракциями. Большинство представителей фитопланктона реки относятся к микрофитопланктону (20-64 мкм) и нанофитопланктону (2-20 мкм). Диаметры створок представителей класса Centrophyceae и длина створок представителей класса Pennatophyceae близки к таковым для других водоемов (Трифорова, 1979; Гутельмахер, 1986; Петрова, 1990; Щур, 2006; Усольцева, 2006; Генкал, 2011).

Трофическое состояние и оценка качества воды р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС по природным сообществам фитопланктона. Индивидуальный индекс сапробности известен для 80 видов и разновидностей водорослей, обнаруженных за период наблюдений в планктоне реки Енисей. Согласно биологической шкале сапробности (ГОСТ..., 1982), по отношению к концентрации органических веществ в водной толще р. Енисей состав водорослей-индикаторов на 16,3 % образован β -мезосапробными формами; 10,0 % – олигосапробными; 30,0 % видов, развивающихся в переходной зоне между олигосапробной и β -мезосапробной (α - β , β - α , α - α). На долю водорослей - показателей низкой степени загрязнения (χ , χ - α , α - χ , χ - β) приходилось 27,5 %. Почти вдвое меньше отмечено видов, толерантных к значительному органическому загрязнению (β - α , α , α - β) – 16,3 %.

Доминирование в видовом составе водорослей группы β -мезосапробионтов определило и качество воды изучаемого района р. Енисей. Так, за период исследований индексы сапробности колебались в пределах от 1,23 (сентябрь 2010 г.) до 2,80 баллов (апрель 2010 г.), что соответствовало олигосапробной и β -мезосапробной зонам самоочищения, 2 и 3 классам качества вод (чистые, удовлетворительно чистые) (Оксиюк и др., 1993). Среднее многолетнее значение индекса сапробности, соответствовавшее β -мезосапробной зоне самоочищения, 3 классу качества вод (удовлетворительно чистые), составляло $1,79 \pm 0,02$ баллов. По среднему значению индекса сапробности по Пантле и Букку (в модификации Сладачака) качество воды р. Енисей оценено II классом качества и степенью загрязненности вод «слабо загрязненная» (РД 52.24.309-2011). Трофический статус р. Енисей на исследуемом участке по биомассе фитопланктона (Жукинский и др., 1981) в 2008-2011 гг. соответствовал мезотрофному типу.

ВЫВОДЫ

1. Вода р. Енисей в 40 км ниже Красноярской ГЭС характеризуется как мягкая, с невысокой минерализацией, низким содержанием биогенных элементов, благополучным кислородным режимом и по соотношению ионов относится к гидрокарбонатному классу, группе

кальция. Качество воды по химическим показателям удовлетворяет требованиям для вод объектов хозяйственно-питьевого водопользования, но по содержанию цинка и меди не соответствует требованиям для воды объектов рыбохозяйственного значения. Изменений гидрхимических показателей, связанных с регулированием Енисея, не выявлено.

2. В флористическом составе пеламофитопланктона зарегистрировано 99 видов и внутривидовых таксонов водорослей, принадлежащих к 47 родам, 28 семействам, 15 порядкам, 8 классам и 6 отделам: Cyanobacteria – 8; Bacillariophyta – 65; Chlorophyta – 22; Dinophyta – 2; Chrysophyta – 1 и Cryptophyta – 1 видов и разновидностей. Выявлено, что в эколого-географической структуре около 80 % всех обнаруженных видов относятся к широко распространенным представителям, а виды водорослей, индифферентные по отношению к галобности, алкалифилы и алкалибионты преобладают над всеми остальными группами. В настоящее время в видовом составе пеламофитопланктона доля собственно планктонных форм (43 %) снизилась по сравнению с исследованиями 1984-1987 гг. (54 %) и осталась на уровне ранее проведенных исследований 1967-1973 гг. (44 %), в планктоне преобладают перифитонные формы.

3. Сезонная динамика численности и биомассы пеламофитопланктона участка р. Енисей нижнего бьефа Красноярской ГЭС характеризуется одним летним пиком, обусловленным развитием диатомовых водорослей. Сравнительный анализ литературных и собственных данных показал, что основное повышение численности и биомассы пеламофитопланктона произошло в 80-е годы XX века, когда численность увеличилась в среднем в 7 раз, биомасса – в 8 раз. В настоящее время величины численности остались на этом же уровне, а биомасса увеличилась в 2 раза за счет нитчатых диатомовых водорослей, попадающих в нижний бьеф со стоком из верхнего бьефа.

4. Достоверных статистических связей групп пеламофитопланктона с гидрохимическими и гидрологическими показателями не выявлено, кроме положительной значимой связи с «химическим потреблением кислорода» (ХПК) и ряда статистически достоверных связей для отделов Chlorophyta и Bacillariophyta. Полученные достоверные корреляции не противоречат биологическому смыслу.

5. В условиях высоких скоростей течения воды на исследуемом участке р. Енисей в пеламофитопланктоне живые клетки водорослей преобладают над мертвыми большую часть года, с максимумом в весенне-летний период. Неблагоприятным периодом для развития пеламофитопланктона является зимний (январь и февраль), когда в отдельные дни доля мертвых клеток возрастает.

6. В условиях реки с большими скоростями течения на исследуемом участке р. Енисей наибольший вклад в общую биомассу пеламофитопланктона вносят нанофитопланктон (2-20 мкм) и микрофитопланктон (20-64 мкм). Диаметры створок представителей класса Centrophyceae и длина створок представителей класса Pennatophyceae близки к таковым из других водоемов и согласуются с результатами ранних исследований.

7. Качество вод р. Енисей в районе водозабора «Гремячий Лог» в 2008-2011 гг. согласно РД 52.24.309-2011 соответствует II классу «слабо загрязненная», а трофический статус, оцененный по биомассе пеламофитопланктона – мезотрофному типу.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых журналах:

1. Пономарева Ю.А. Изучение структурных характеристик автотрофного звена р. Енисей в условиях сброса водонапорной ГЭС // *Фундаментальные и прикладные проблемы науки: Материалы VII Международного симпозиума*: Т. 4. – М.: РАН, 2012. – С. 41-47.

2. Пономарева Ю.А. Химический состав воды и структура фитопланктона в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // *Вестник КрасГАУ*, 2013. – № 7. – С. 183-188.

3. Андрианова А.В., Апонасенко А.Д., Макарская Г.В., Пономарева Ю.А. Комплексная оценка состояния экосистемы малой горной реки в районе строительства железнодорожной магистрали // *Вестник КрасГАУ*, 2013. – № 8. – С. 97-103.

4. Пономарева Ю.А., Щур Л.А. Сезонная и межгодовая динамика фитопланктона реки Енисей в районе водозабора Гремячий Лог // Биология внутренних вод, 2014. – № 1. – С. 38-40.

5. Заворуев В.В., Иванова Е.А., Пономарева Ю.А. Таксономический состав и экологическая структура потамофитопланктона нижнего бьефа Красноярской ГЭС // Вода: химия и экология, 2014. – № 7. – С. 48-53.

Материалы и тезисы конференций:

6. Пономарева Ю.А. Изменения структурных характеристик фитопланктона в градиенте абиотических факторов // VI Всесибирский конгресс женщин-математиков (в день рождения С.В. Ковалевской): Материалы Всероссийской конференции (Красноярск, 15-17 января 2010 г.). – Красноярск, 2010. – С. 346-351.

7. Пономарева Ю.А. Фитопланктонное сообщество р. Енисей в районе водозабора «Гремячий Лог» // Материалы XV международной экологической студенческой конференции «Экология России и сопредельных территорий». – Новосибирск, 2010. – С. 68.

8. Пономарева, Ю.А. Функционирование речного фитопланктона в условиях водозабора «Гремячий Лог» (р. Енисей) / Ю.А. Пономарева // Чтения памяти Л.М. Черепнина: Материалы V Всероссийской Конференции «Флора растительности Сибири и Дальнего Востока» (Красноярск, 23-26 мая 2011 г.). – Красноярск, 2011. – С. 155-157.

9. Пономарева Ю.А. Первичная продукция фитопланктона реки Енисей // Материалы XVI международной экологической студенческой конференции «Экология России и сопредельных территорий». – Новосибирск, 2011. – С. 45.

10. Жук А.С., Пономарева Ю.А. Особенности альгологического и химического состава воды реки Енисей в районе водозаборов г. Красноярска // Материалы VII Международной конференции «Реки Сибири (и Дальнего Востока)» (Хабаровск, 30-31 мая 2012 г.). – Хабаровск, 2012. – С. 148-152.

11. Пономарева Ю.А. Современное состояние фитопланктона реки Енисей в районе водозабора «Гремячий Лог» // Природные ресурсы, биоразнообразие и перспективы естественнонаучного образования: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной памяти Ирины Викторовны Бекишевой – ученого и педагога. – Омск, 2012. – С. 135-137.

12. Заворуев В.В., Пономарева Ю.А. Оценка качества воды р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Водные ресурсы Енисейского региона: Материалы 8-й конференции, посвященной Международному дню водных ресурсов – 22 марта и Году охраны окружающей среды. – Красноярск, 2013. – С. 28-41.

13. Заворуев В.В., Пономарева Ю.А., Заворуева Е.Н. О максимальных концентрациях фитопланктона в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Водные ресурсы Енисейского региона: Материалы 9-й конференции, посвященной Международному дню воды – 22 марта. – Красноярск, 2014. – С. 25-31.

14. Пономарева Ю.А. Многолетняя динамика потамофитопланктона р. Енисей // Водоросли: проблемы таксономии, экологии и использование в мониторинге. Материалы докладов III международной научной конференции (Борок, 25-29 августа 2014 г.). – Борок, Ярославская область, 2014. – С. 226-227.

15. Пономарева Ю.А. Физиологическое состояние потамофитопланктона р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // XI съезд Гидробиологического общества при Российской академии наук (Красноярск, 22-26 сентября 2014 г.) [Электронный ресурс] / гл. ред. М.И. Гладышев, отв. за вып. И.И. Морозова. – Электрон. дан. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – С. 135.