

На правах рукописи



Шулепина Светлана Петровна

**СООБЩЕСТВА ДОННЫХ ЖИВОТНЫХ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ
ЭКОСИСТЕМ РАЗНОТИПНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ
БАСЕЙНА РЕКИ ЕНИСЕЙ**

03.02.10 – гидробиология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Красноярск - 2010

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» на кафедре водных и наземных экосистем.

Научный руководитель: кандидат биологических наук, профессор
Гольд Зоя Георгиевна

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, профессор
Кратасюк Валентина Александровна

кандидат биологических наук, с.н.с.
Балушкина Евгения Владимировна

Ведущая организация: Институт экологии Волжского бассейна РАН
(г. Тольятти)

Защита состоится «10» декабря 2010 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.15 при Сибирском федеральном университете по адресу: 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, ауд. Р8-06
Тел./факс 8(391)244-87-90

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета.

Автореферат разослан « 6 » ноября 2010 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.б.н., доцент



Н.А. Гаевский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время при изучении антропогенного влияния на пресноводные экосистемы наиболее надежным и информативным индикатором состояния водной среды служат показатели зообентоса. Они удовлетворяют многим требованиям, применяемым к биоиндикаторам: удобство сбора и обработки, повсеместная встречаемость, относительно высокая плотность и крупные размеры, достаточно продолжительный срок жизни, чтобы аккумулировать загрязняющие вещества за длительный период (Алимов, 1990; Балушкина, 2006; Безматерных, 2007; Зинченко и др., 2007; Щербина, 2009 и др.).

В мировой практике используется свыше 60 методов биомониторинга, в которые включены различные характеристики зообентоса (Баканов, 2000). Наличие такого большого числа методов свидетельствует о том, что универсального метода нет. Большинство методов биологического мониторинга разработано учеными применительно к региональным условиям (Goodnight, Whitley, 1961; Vudiviss, 1981; Балушкина, 1997). В связи с этим, наиболее важной является проблема модификации различных индикационных индексов к конкретным водным объектам бассейна России. Выбор индикаторных показателей должен учитывать реальное состояние экосистемы и динамику структуры донных сообществ, сформированных под влиянием различных режимов эксплуатации и специфического загрязнения водных объектов. Вышесказанное в полной мере отражает актуальность и значимость исследований макрозообентоса, как важного звена в оценке состояния водных экосистем.

В качестве модельных были выбраны водные объекты, различающиеся по гидрологическим показателям, степени и характеру антропогенного воздействия:

- Красноярское водохранилище (водоем лимнического типа подвергается комплексному воздействию промышленного и селитебного факторов);

- «пруды–отстойники – р. Енисей» (искусственные водоемы смешанного типа, включающие лимническую часть и водоток, загрязняемые преимущественно стоками фармацевтического производства);

- «ручей Черёмушный - р. Енисей» (естественный водоток, принимающий оформленные стоки алюминиевого производства и впадающий в р. Енисей).

Цель работы: изучить структуру макрозообентоса и определить его индикаторную значимость в оценке качества воды разнотипных водных объектов, находящихся в условиях разного антропогенного воздействия (на примере бассейна р. Енисей).

Задачи исследований:

1. Изучить таксономический состав и видовое разнообразие макрозообентоса разнотипных водных объектов бассейна р. Енисей.

2. Изучить пространственно-временную динамику плотности (численности, биомассы) зообентоса исследуемых водоемов и водотоков бассейна р. Енисей.

3. Определить качество воды и экологическое состояние разных по уровню антропогенной нагрузки районов исследуемых водных объектов с использованием различных методов биоиндикации и выявить их информативность на региональном уровне.

4. Провести сравнительный анализ структурных характеристик зообентоса и приемов биологической оценки состояния экосистем изученных разнотипных во-

доемов и водотоков с разным режимом антропогенного воздействия. Выработать рекомендации к применению наиболее показательных методов индикации.

Научная новизна. Впервые для разнотипных водных объектов бассейна р. Енисей (Красноярское водохранилище 2001-2005 гг., водная система «пруды-отстойники – р. Енисей», ручей Черемушный) определен таксономический состав зообентоса. Впервые изучена пространственно-временная динамика структурных характеристик макрозообентоса с использованием трофо-экологических параметров бентофауны и регрессионных уравнений связи среднесезонных и месячных величин численности зообентоса. По структурным характеристикам донных сообществ проведена оценка качества воды и на ее основе осуществлена модификация методов биоиндикации для данного региона. Для исследуемых водных объектов предложены списки видов с определенными величинами индивидуальной сапротоксобиотности. Разработана схема использования наиболее информативных дескрипторов качества воды по макрозообентосу, учитывающая особенности конкретных типов водных объектов бассейна р. Енисей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Установлены особенности видового состава и распределения величин плотности зообентоса исследуемых водных объектов, определяемые спецификой абиотических факторов и уровнем антропогенного воздействия. В Красноярском водохранилище облик зообентоса в значительной степени определяют абиотические факторы, связанные с глубиной, в озерно-речных системах – антропогенные стоки.

2. Плотность донных сообществ и показатели качества воды имеют четко выраженную пространственную динамику в исследуемых водных объектах бассейна р. Енисей.

3. Информационные индексы, учитывающие таксономическую структуру на уровне классов, подсемейств, не дают адекватных оценок качества воды в исследуемых водных объектах бассейна р. Енисей.

4. Объективная информация по оценке качества воды разнотипных водных объектов бассейна р. Енисей получена по экологическим модификациям, по модифицированной (для бассейна р. Енисей) схеме расчета биотического индекса Вудивисса, индексу сапротоксобиотности, рассчитанному по региональным величинам индивидуальной сапротоксобиотности видов.

Практическое применение. Результаты исследования включены в информационную модель Красноярского водохранилища (величины индивидуальной сапротоксобиотности зообентоса, динамика плотности, и др.), в программу Экологического мониторинга экосистемы Красноярского водохранилища. Полученные данные используются в программах Экологического мониторинга качества поверхностных вод, проводимых Красноярским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Енисейским бассейновым водным управлением Федерального агентства водных ресурсов, и могут быть использованы научно-исследовательскими и отраслевыми организациями. Результаты включены в учебные дисциплины, преподаваемые в Сибирском федеральном университете: «Зоология», «Санитарная гидробиология», «Водная токсикология».

Апробация работы. Результаты исследований представлены и доложены на научно-практической конференции "Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов" (Красноярск, 1999 г.); международной конференции «Экология и рациональное природопользование на рубеже веков. Итоги и перспективы» (Томск, 2000 г.); VIII Гидробиологическом съезде (Калининград, 2001 г.); II Меж-

дународной научной конференции "Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды" (Минск-Нарочь, 2003 г.); II международной конференции «Биотехнология – охране окружающей среды» (Москва, 2004 г.); международной конференции, посвященной памяти доктора биологических наук, профессора Б. А. Флерова (Борок, 2005 г.); международной конференции «Современное состояние водных биоресурсов» (Новосибирск, 2008 г.); X Съезде Гидробиологического общества при РАН (Владивосток, 2009 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 33 работах, в том числе 3 – в журналах, рекомендованных ВАК, соавтор коллективной монографии.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 179 страницах машинописного текста, состоит из введения, 4 глав, списка литературы (206 источников, в том числе 28 - иностранных), содержит 55 рисунков, 12 таблиц, приложение.

Автором работы осуществлялся сбор, обработка проб зообентоса, внесение материалов в базу данных «Биота», модуль «Зообентос». Автор принимала непосредственное участие в разработке списков индивидуальной сапротоксности видов зообентоса, в модификации рабочей таблицы, по которой рассчитывается индекс Вудивисса, в оценке экологического состояния качества воды по комплексу показателей, в статистической обработке полученных данных, анализе всех результатов.

Работа поддержана госбюджетной темой «Разработки критериев комплексной биологической оценки состояния природных экосистем и качества окружающей среды»; хоздоговорной темой по заказу Красноярского государственного краевого экологического фонда «Разработка принципов комплексной биологической оценки качества воды и состояния экосистемы р. Енисей в черте г. Красноярска»; программами Министерства образования Российской Федерации «Фундаментальные проблемы окружающей среды», «Университеты России – фундаментальные исследования»; при поддержке грантов Министерства образования Российской Федерации: «Фундаментальные исследования в области естественных наук», «Фундаментальные исследования и высшее образование» и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF № REC-002); грантом ФЦП «Интеграция» № А0018 «Развитие базовой кафедры гидробиологии и ихтиологии - учебно-научного центра подготовки и повышения квалификации специалистов в области исследования и рациональной эксплуатации водных экосистем»; грантом Министерства образования РФ (№ А 03-2.12.878) по программе «Поддержка научно-исследовательской работы аспирантов вузов».

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

Глава 1. Обзор литературы

На основе опубликованных данных рассмотрена роль зообентоса в оценке качества воды и состояния водных экосистем. Проанализирована роль донного сообщества в биоиндикации и биотестировании природных вод. Рассмотрено влияние антропогенной эвтрофикации, термофикации, закисления вод, нефтяного загрязнения, тяжелых металлов на донные беспозвоночные. Проведен анализ широ-

ко используемых методов биоиндикации. Отмечены достоинства и недостатки использования индексов Балушкиной, Гуднайта и Уитлея, Вудивисса, сапробности в оценке качества воды. Обсуждена необходимость адаптировать методы биоиндикации к региональным условиям.

Глава 2. Материалы и методы

В работу вошли материалы, отобранные на трех разных типах водных экосистем:

1. Красноярское водохранилище было заполнено в период 1967 - 1970 гг. в среднем течении реки Енисей. Максимальная ширина водохранилища - 15 км, минимальная - 2,5 км. Средняя глубина водохранилища - 36,7 м, максимальная - 105 м (у плотины). По комплексу гидрологических показателей для анализа выделены районы и плесы: верхний район – Усть-Абаканский, Моховский, Краснотуранский плесы, средний район - Новоселовский, Приморский плесы, нижний район – Приплотинный плес.

2. Водная система «пруды-отстойники – р. Енисей». Сточные воды с фармацевтического производства поступали в систему прудов-отстойников (ст. 1), которые имели выход в р. Енисей (ст. 2). В р. Енисей станции располагались 500 м выше (ст. 3) и ниже (ст. 4) устья прудов-отстойников (в соответствии с Правилами охраны вод..., 1971 и Правилами контроля вод от загрязнения..., 1982).

3. Водная система «Ручей Черемушный – р. Енисей». Ручей Черемушный принимает сточные воды алюминиевого производства и впадает в р. Енисей. Протяженность ручья Черемушного – 14 км. Отбор проб в ручье Черемушном осуществляли на 4 станциях, в р. Енисей - 500 м выше (ст. 5) и ниже (ст. 6) устья ручья Черемушного.

Водные объекты, периоды сбора и объем собранного и обработанного материала приведены в таблице 1.

Пробы зообентоса (в трёх повторностях) отбирали фракционным дночерпателем системы «Экмана-Берджи» (с площадью захвата $S=0,01\text{м}^2$), пневматическим трубчатым дночерпателем системы «Мордухай-Болтовского» ($S=0,005\text{м}^2$), вращающимся количественным скребком системы Г. Д. Дулькейта ($S=0,1\text{м}^2$) в зависимости от характера грунтов. Грунт промывали через сито № 28-32. Всего отобрано 474 пробы зообентоса (табл.1).

Таблица 1 - Объем материала, собранного на различных водных объектах

Водный объект	Период отбора проб	Объем собранного материала
Красноярское водохранилище	август, 2001-2002, 2004-2005 гг.	234 пробы
Пруды – отстойники и прилегающий к ним район р. Енисей	август, октябрь 1998 г., февраль, май, июль 1999 г., июнь - август 2000 г.	108 проб
Ручей Черёмушный и прилегающий к нему район р. Енисей	июнь - август 1998 г., 2000 г. июль 1999 г.	132 пробы

В главе приводится гидрологическое, гидрохимическое описание водных объектов, на которых выполнялись исследования. Гидрохимический состав воды

исследуемых водных объектов проанализирован по материалам Красноярского центра по мониторингу окружающей среды, Центра лабораторного анализа и технических измерений по Красноярскому краю и Сибирского федерального университета. В составе воды наблюдали превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) по следующим показателям: в районе прудов-отстойников - по железу (до 12 ПДК), нефтепродуктам (2 ПДК), аммонийному азоту (2 ПДК); в районе поступления сточных вод алюминиевого производства в ручей Черемушный - нефтепродуктам (до 11 ПДК), аммонийному азоту (2 ПДК), железу (3 ПДК), фторидам (до 192 ПДК), алюминию (13 ПДК); в Красноярском водохранилище в период 2001-2005 гг. - нефтепродуктам (до 11 ПДК), железу (8 ПДК), марганцу (4 ПДК); цинку (5 ПДК); меди (до 7 ПДК); алюминию (3 ПДК); свинцу (до 12 ПДК).

Камеральную обработку проводили согласно общепринятым методикам (Жадин 1960; Методика изучения..., 1975). Расчеты средних величин численности, биомассы, продукции, деструкции, индекса видового разнообразия Шеннона выполнены в универсальной базе «Биота», встроенной в базу данных «Paradox 9» (Свид. 2003620149. Рос. патент. г. Москва. 2003). Продукцию и траты на обменные процессы рассчитывали физиологическим методом. Информация о зообентосе Красноярского водохранилища 1981 и 1993 гг. для сравнительного анализа взята из базы данных «Биота». Оценку влияния отдельных факторов и их совместное воздействие на развитие донных сообществ проводили по одно- и двухфакторному дисперсионному и корреляционному анализам (Плохинский, 1978).

Для анализа сходства видовой структуры бентосных сообществ использовали коэффициент Сёренсена-Чекановского (Шмидт, 1984). Оценку качества воды по структурным характеристикам зообентоса проводили по следующим индексам: Шеннона (1963); Гуднайта и Уитлея (1961); Балушкиной (1997); Вудивисса (1981), модифицированного для Красноярского водохранилища (Гольд, Шулепина, 2008); сапробности Пантле-Букка в модификации Дзюбана и Кузнецова (1981); сапротоксобиности (Яковлев, 1988) и по экологическим модификациям зообентоса (РД 52.24.633-2002). Значения индексов ранжировали в соответствии с ГОСТ 17.1.3.07-82. Трофический статус Красноярского водохранилища оценили по классификации С.П. Китаева (1984).

Глава 3. Пространственно-временная динамика структурных величин зообентоса

В составе бентофауны исследованных водных объектов зарегистрировано 142 вида донных беспозвоночных (табл. 2), из них: в Красноярском водохранилище в период 2001-2005 гг. - 74, в прудах-отстойниках – 81, в ручье Черемушном – 83 вида. Индекс Шеннона был минимальный в Красноярском водохранилище ($H=0,71\pm 0,11$ бит), максимальный – в ручье Черемушном ($H=1,69\pm 0,14$ бит).

Таблица 2 - Число видов в составе основных таксономических групп зообентоса разнотипных водных объектов бассейна р. Енисей

Водный объект	Х	О	М	П	Пр.	Всего
Красноярское водохранилище	45	9	5	5	10	74
Пруды–отстойники и прилегающий к ним район р. Енисей	46	8	4	6	17	81
Ручей Черёмушный и прилегающий к нему район р. Енисей	43	6	7	0	27	83

Примечание: Х - хирономиды, О – олигохеты, М – моллюски, П – поденки, Пр. – прочие.

Пространственно-временная организация зообентоса в различные периоды функционирования Красноярского водохранилища. В составе макрозообентосных сообществ Красноярского водохранилища за 25-летний период функционирования зарегистрировано 244 вида беспозвоночных животных (Гольд, Скопцова, Шулепина, 2008). В 2001-2005 гг. (31-35 года функционирования Красноярского водохранилища) в видовом составе зообентоса зарегистрировано 74 вида беспозвоночных животных, относящихся к семи классам (*Insecta* – 54, *Oligochaeta* – 9, *Gastropoda* – 5, *Crustacea* -3, *Arachnida* – 1, *Nematoda* – 1, *Turbellaria* - 1). Фаунистическое разнообразие сообществ бентоса включало, в основном, личинок хирономид – от 14 до 31 вида (56-67%). Олигохет отмечалось 3-6 видов (10-13%). По всей пелагиали водохранилища встречены олигохеты тубифициды, в то время как наидиды - отмечены эпизодически. В целом бентофауна Красноярского водохранилища имела хирономидно-олигохетный характер.

В верховье водохранилища зарегистрировано максимальное видовое разнообразие донного сообщества (69 видов), что обусловлено небольшими глубинами (1,0 - 25,0 м) водоема и наличием здесь практически всех типов грунтов - галька, песок, ил, детрит, высшая растительность. Основу бентофауны определяли личинки хирономид (0,34 тыс. экз/м²; 0,25 г/м²), с преобладанием β-мезосапробов *Cryptochironomus defectus*, *Polypedilum convictum*, *P. scalaenum*. В составе олигохет (0,18 тыс. экз/м²; 0,20 г/м²) доминировала *Limnodrilus hoffmeisteri*. Средняя за период исследований плотность зообентоса составила 0,66 тыс. экз/м²; 0,82 г/м² (табл. 3).

Таблица 3 - Структурообразующие комплексы зообентоса Красноярского водохранилища по районам, август 2001-2005 гг.

Район	Верхний	Средний	Нижний
Вид	род <i>Polypedilum</i> род <i>Cricotopus</i> <i>Cryptochironomus defectus</i> <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	<i>Tubifex tubifex</i> <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	<i>Tubifex tubifex</i> <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> <i>Gmelinoides fasciatus</i>
n	69	11	15
H	1.29±0.12	0.07±0.04	0.44±0.19
N	0.66±0.11	0.45±0.21	0.41±0.21
B	0.82±0.15	0.58±0.09	0.92±0.30

Примечание: n - число видов, H – индекс Шеннона, бит, N – численность, тыс. экз/м², B – биомасса, г/м².

В среднем и нижнем районах водохранилища (с увеличением глубины до 100 м и снижением разнообразия грунтов - серый ил) зарегистрировано минимальное (11-15 видов) видовое разнообразие зообентоса. По плотности преобладали олигохеты полисапробы *Limnodrilus hoffmeisteri* и *Tubifex tubifex* (0,19 тыс. экз/м²; 0,24 г/м²), в нижнем районе наряду с олигохетами по плотности доминировала амфипода *Gmelinoides fasciatus* (0,18 тыс. экз/м²; 0,51 г/м²). Среди хирономид единично отмечали полисапробов *Chironomus plumosus*, β-мезосапробов *Polypedilum bicrenatum*, *P. gr. exectum*, *Procladius ferrugineus*. Количественные показатели численности донных беспозвоночных в среднем и нижнем районах водохранилища

снижены в 1,6 раза, по сравнению с верхним районом (см. табл. 3). Биомасса бентофауны была минимальна в среднем районе, в верхнем и нижнем районах водохранилища биомасса донного сообщества существенно не различалась ($p > 0,05$).

Видовое разнообразие бентофауны, рассчитанное по индексу Шеннона, было максимальным (1,29 бит) - в верхнем районе, минимальным (0,07 бит) – в среднем районе водохранилища, и в целом, характеризовало макрозообентос водохранилища как бедный и монотонный (см. табл. 3).

Изменения в видовом составе, плотности зообентоса от верхнего района к нижнему обусловлены увеличением глубины водоема, заиливанием значительных площадей дна и снижением разнообразия грунтов.

Для выявления структурной организации зообентоса от начала заполнения водохранилища до сегодняшних дней рассмотрены период формирования зообентоса (на примере одиннадцатого года функционирования водохранилища – 1981 г.), период становления бентофауны (на примере двадцать третьего года - 1993 г.) и период сформированности фауны (2001-2005 гг.).

Количество видов донных беспозвоночных по годам исследования варьировало от 25 (2002 г.) до 45 видов (2004 г.). Этот период (2001-2005 гг.) охарактеризован, как период завершения стадии становления донной фауны. Видовая структура упростилась, по сравнению с 1981 г. (71 вид) и осталась практически неизменной по сравнению с 1993 г. (32 вида). Эврибионтные формы расселились от верховья к плотине. Видовое разнообразие зообентоса Красноярского водохранилища в период 2001-2005 гг. изменялось в узком диапазоне величин индекса Шеннона (H): $0,47 \pm 0,16$ бит (2004 г.) – $0,62 \pm 0,24$ бит (2005 г.), что указывало об относительно стационарном состоянии видового состава бентофауны в этот период. Низкое видовое разнообразие донного сообщества Красноярского водохранилища в период 2001-2005 гг., в сравнении с 1993 г. ($0,99 \pm 0,02$ бит) и 1981 г. ($2,12 \pm 0,08$ бит), свидетельствовало об упрощении видовой структуры зообентоса.

В межгодовой динамике биомассы основных групп бентофауны выявлено, что биомасса личинок хирономид снизилась с $0,98 \text{ г/м}^2$ (1981 г.) до $0,09 \text{ г/м}^2$ (2002 г.) ($p < 0,05$) и их доля в общем бентосе - с 37% до 11% соответственно. Биомасса олигохет уменьшилась с $1,40 \text{ г/м}^2$ (1981 г.) до $0,19 \text{ г/м}^2$ (2001 г.) ($p < 0,05$) и их доля в общем бентосе - с 52% до 29% соответственно, однако и на современном этапе роль олигохет и личинок хирономид в общей биомассе зообентоса остается ведущей.

В межгодовой динамике величин плотности зообентоса выявили следующие особенности: средняя численность бентофауны Красноярского водохранилища за период 2001-2005 гг. варьировала от $0,43 \pm 0,07$ тыс.экз/м² до $0,75 \pm 0,20$ тыс.экз/м²; средняя биомасса зообентоса за период 2001-2004 гг. изменялась не значительно от $0,54 \pm 0,15 \text{ г/м}^2$ до $0,73 \pm 0,20 \text{ г/м}^2$, пик биомассы ($1,82 \pm 0,60 \text{ г/м}^2$) зарегистрирован в 2005 г. и обусловлен развитием амфипод (рис. 1).

Незначительные колебания плотности донных беспозвоночных в период 2001-2005 гг. указывали о стабилизации в развитии сообществ бентонтов. Отмечено значительное снижение величин численности и биомассы зообентоса в среднем по водохранилищу по сравнению с 1981 г. и 1993 г. Так, численность донных беспозвоночных за период 2001-2005 гг. была в 2,9 раза ниже ($p < 0,05$), чем в 1993 г. ($1,24 \pm 0,61$ тыс.экз/м²) и в 25 раз ниже ($p < 0,05$), чем в 1981 г. ($10,73 \pm 3,76$ тыс.экз/м²). Биомасса зообентоса за период 2001-2004 гг. снизилась по сравнению с 1993 г. ($2,32 \pm 0,43 \text{ г/м}^2$) и 1981 г. ($2,67 \pm 0,61 \text{ г/м}^2$) в 4,3-4,9 раза ($p < 0,05$).

Низкие величины видового разнообразия, плотности зообентоса Красноярского водохранилища в период 2001-2005 гг. обусловлены увеличением глубины, снижением разнообразия грунтов, уменьшением роли макрофитов.

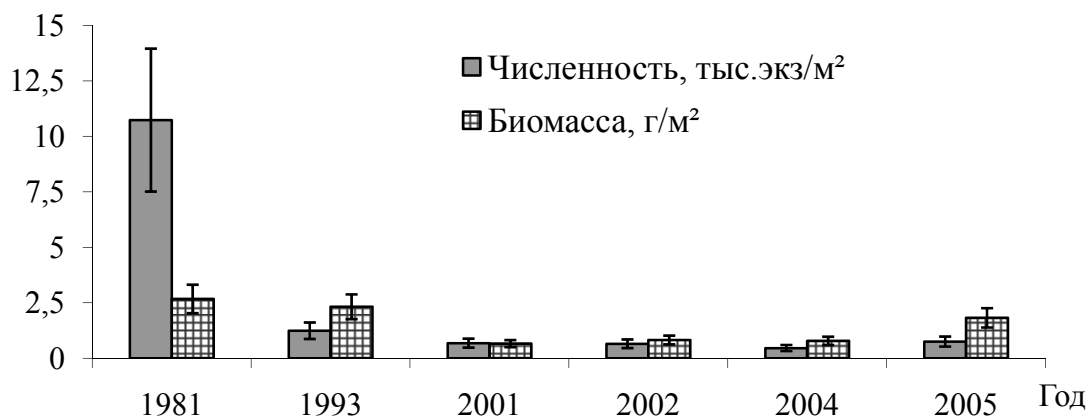


Рис. 1. Межгодовая динамика численности и биомассы зообентоса Красноярского водохранилища (август).

Структурная организация зообентоса прудов – отстойников фармацевтического производства и прилегающего к ним участка р. Енисей. Со сточными водами фармацевтического производства поступают и кумулируются загрязняющие вещества в систему прудов-отстойников, которые имеют выход в р. Енисей. В прудах-отстойниках развиваются процессы эвтрофирования. В видовом составе зообентоса водной системы «пруды-отстойники - р. Енисей» зарегистрирован 81 вид донных беспозвоночных, относящиеся к 6 классам (*Insecta* – 68, *Oligochaeta* – 8, *Gastropoda* – 4, *Hirudinea* – 3, *Crustacea* – 2, *Nematoda* – 1).

В районе поступления сточных вод фармацевтического производства в пруд-отстойник (ст. 1) зарегистрировано 37 видов донных беспозвоночных. Преобладали эврибионтные формы - личинки хирономид р. *Chironomus*, *Prodiamesa olivacea*, пелофильные олигохеты *Limnodrilus hoffmeisteri*, моллюски *Choanomphalus rossmaessleri* (табл. 4), что обусловлено развитием макрофитов и значительным содержанием органических веществ в грунтах. В устье прудов-отстойников зарегистрировано 35 видов донных беспозвоночных. Состав бентофауны определяли типичные литофилы: олигохеты *Stylodrilus herringianus*, пиявки *Herpobdella octoculata*, амфиподы *Gmelinoides fasciatus*. Изменение в составе видов в районе ст.2, по сравнению со ст. 1, связано с тем, что органические и токсические вещества, поступающие со сточными водами, проходят через систему прудов-отстойников, заросших высшей водной растительностью, в которых проходят процессы осадконакопления и самоочищения. Органические вещества в прудах-отстойниках служат пищей для грунтоедов и фитофилов (олигохет, личинок хирономид и моллюсков), тем самым донные беспозвоночные участвуют в процессах самоочищения водоемов.

В р. Енисей, 500 м ниже устья прудов-отстойников отмечалось увеличение числа видов бентофауны (52), по-сравнению с районом р. Енисей, 500 м выше устья прудов-отстойников (32). Это объясняется дрейфом донных беспозвоночных со ст. 2. Структурообразующий комплекс в районе ст. 3 и 4 не различался, по плотности лидировали олигохеты *Stylodrilus herringianus* и амфиподы *Gmelinoides*

fasciatus, отмечались реофилы, в частности - поденки. Все эти виды характерны для р. Енисей (Гладышев, ..., Шулепина и др., 2004; Шулепина, 2000, 2003.).

Таблица 4 - Структурообразующие комплексы зообентоса пруда-отстойника, устья прудов-отстойников, р. Енисей, 500 м выше устья прудов-отстойников, р. Енисей, 500 м ниже устья прудов-отстойников, 1998-2000 гг.

Объект	Пруд-отстойник, (ст. 1)	Устье прудов-отстойников, (ст. 2)	Р. Енисей, 500 м выше устья прудов-отстойников, (ст. 3)	Р. Енисей, 500 м ниже устья прудов-отстойников, (ст. 4)
Вид	<i>Choanomphalus rosmaessleri</i> , <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> , <i>Prodiamesa olivacea</i> , <i>Chironomus plumosus</i>	<i>Gmelinoides fasciatus</i> , <i>Herpobdella octoculata</i> <i>Stylodrilus herringianus</i>	<i>Gmelinoides fasciatus</i> , <i>Stylodrilus herringianus</i>	<i>Gmelinoides fasciatus</i> , <i>Stylodrilus herringianus</i> , <i>Prodiamesa olivacea</i>
#n	37	35	32	52
*Н	1.53±0.19	2.43±0.16	1.18±0.17	1.58±0.11

*Н - индекс Шеннона, бит; #n – число видов

Наибольшее сходство видового состава зообентоса по коэффициенту Серенсе-на-Чекановского, рассчитанного за весь период исследования, отмечено между устьем прудов-отстойников (ст. 2) и районами р. Енисей (ст. 3, 4) ($K_{sc}=0,74-0,49$, $p \geq 0,05$), что связано со сносом органических веществ и организмов течением с верхних станций к нижним.

Структурообразующий комплекс бентофауны пруда-отстойника в среднем за весь период исследования определяли олигохеты (40% от численности, 17% от биомассы) и моллюски (30% от численности и 62% от биомассы) (рис. 2). В устье

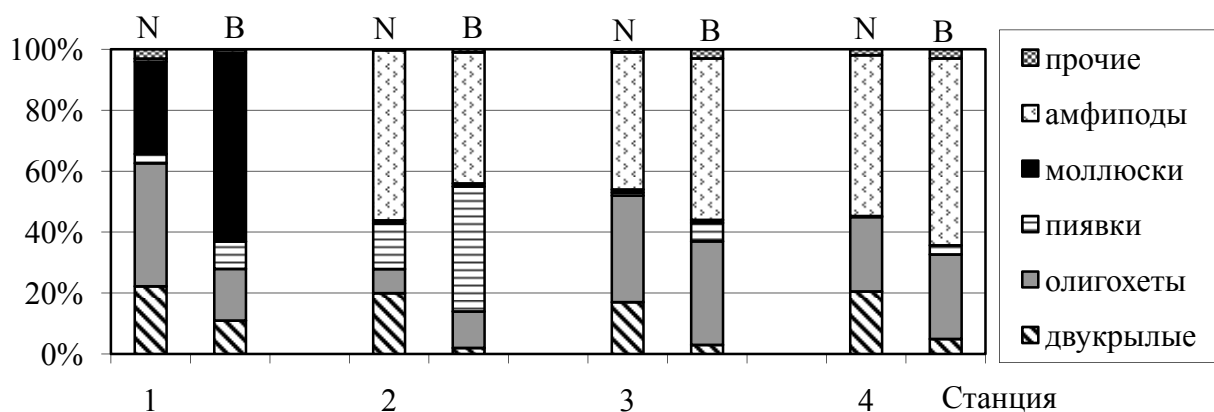


Рис. 2. Пространственная динамика численности (N, %) и биомассы (B, %) основных групп зообентоса пруда-отстойника (ст. 1), устья прудов-отстойников (ст. 2) и р. Енисей (ст. 3, 4), 1998-2000 гг.

прудов-отстойников в составе зообентоса преобладали амфиподы (43% от общей биомассы; 56% от общей численности), которые отсутствовали в пруду-отстойнике, и пиявки (15 и 41% соответственно от общей численности и биомассы). В р. Енисей (ст. 3, 4) по плотности лидировали амфиподы (45-54% от числен-

ности; 53-62% от биомассы) и олигохеты (35-25% от общей численности; 34-28% от общей биомассы).

Максимальная плотность донных беспозвоночных зарегистрирована в пруду-отстойнике ($2,40 \pm 0,80$ тыс. экз/м²; $16,65 \pm 6,22$ г/м²), что связано с поступлением в пруд-отстойник сточных вод фармацевтического производства. В районе устья прудов-отстойников плотность зообентоса в среднем за весь период исследования составила – $1,04$ тыс. экз/м², $5,08$ г/м², что более чем в 2 раза меньше, чем в пруду-отстойнике (рис. 3). В р. Енисей (от ст.3 к ст.4) средняя за сезон плотность зообентоса имела тенденцию к увеличению (от $0,78$ до $0,80$ тыс. экз/м²; от $1,49$ до $2,16$ г/м²). что обусловлено сносом из района ст. 2 к району ст. 4 как органических веществ, способствующих развитию олигохет и пиявок, так и собственно организмов зообентоса.



Рис. 3. Пространственная динамика численности (тыс. экз/м²) и биомассы (г/м²) зообентоса пруда-отстойника (ст. 1), устья прудов-отстойников (ст. 2) и р. Енисей (ст. 3, 4), 1998-2000 гг.

Численность и биомасса зообентоса снижалась от конца лета к осени и далее к зиме практически на всех исследуемых районах за счет отмирания бентонтов, вылета гетеротопных организмов и миграции олигохет в более глубокие слои грунта.

В целом, загрязнение сточными водами фармацевтического производства существенно не повлияло на структуру зообентоса р. Енисей ниже прудов-отстойников.

Структурная организация зообентоса ручья Черемушного и прилежащего района р. Енисей. В составе зообентоса ручья Черемушного и прилежащего к нему участка р. Енисей зарегистрировано 83 вида донных беспозвоночных, относящихся к 7 классам (*Insecta* – 62, *Oligochaeta* – 6, *Gastropoda* – 7, *Hirudinea* – 4, *Crustacea* -2, *Nematoda* – 1, *Tardigrada* - 1), доминировали личинки хирономид - 43 вида. На всем протяжении ручья зообентос носил преимущественно пелофильный характер, тогда как литофильные донные сообщества отмечены только в устье ручья. Структурообразующий комплекс видов в районе исследования представлен в таблице 5.

Видовой состав бентофауны от условно фонового района (ст. 1) к зоне поступления стоков (ст. 2) варьировал незначительно. По мере удаления от места поступления стоков к устью ручья (ст. 4) видовая структура донных беспозвоночных становилась более разнообразной, что подтвердилось значениями индекса Шеннона (см. табл. 5). На участке ручья ниже места поступления загрязнений из донных биоценозов исчезли личинки двукрылых, а число видов хирономид, олигохет и

пиявок увеличилось. Отличительный характер зообентоса в устье ручья обусловлен наличием высшей водной растительности, среди которой на богатых органикой грунтах развились личинки хирономид р. *Glyptotendipes*, появились личинки двукрылых, жуков, большекрылок, стрекоз, ручейников и амфиподы.

Сходный состав донных сообществ зарегистрирован только в районе сброса сточных вод в ручей Черемушный (ст. 2) и в 500 м ниже по течению (ст. 3) ($K_{сч}=0,76$, при $p>0,05$). Видовое разнообразие зообентоса в р. Енисей, выше устья ручья Черемушного (ст. 5) и ниже устья (ст. 6) существенно не различилось ($K_{сч}=0,77$, при $p>0,05$).

Таблица 5 - Структурообразующие комплексы зообентоса ручья Черемушного (ст. 1, 2, 3, 4), и прилегающего района р. Енисей (ст. 5, 6)

Объект	Ручей Черемушный, фоновый р-он (ст. 1)	Ручей Черемушный, поступление стоков (ст. 2)	Ручей Черемушный, 500 м ниже поступления стоков (ст. 3)	Ручей Черемушный, устье, (ст. 4)	Р. Енисей, 500 м выше устья ручья, (ст. 5)	Р. Енисей, 500 м ниже устья ручья, (ст. 6)
Вид	<i>Procladius choreus</i> , <i>Prodiamesa olivacea</i> , <i>Tubifex tubifex</i> , <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	<i>Cricotopus silvestris</i> , <i>Cricotopus bicinctus</i> , <i>Choanophalus rossmaessleri</i>	<i>Tubifex tubifex</i> , <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> , <i>Physa acuta</i>	<i>Gmelinoides fasciatus</i> , <i>Chironomus plumosus</i> , <i>Glyptotendipes paripes</i> , <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	<i>Gmelinoides fasciatus</i> , <i>Polypedilum pedestre</i>	<i>Gmelinoides fasciatus</i> , <i>Polypedilum pedestre</i>
#n	24	25	32	63	42	43
*Н	1.42±0.29	1.36±0.23	1.38±0.26	2.66±0.30	1.50±0.40	1.65±0.37

*Н - индекс Шеннона, бит; #n – число видов.

В ручье Черемушном на станции 1 по плотности преобладали олигохеты, на станции 2 на лидирующие позиции вышли личинки хирономид и моллюски. По направлению от станции 2 к станции 3 на однородных биотопах русла ручья (серые и черные илы) выявили уменьшение доли хирономид и других личинок двукрылых и увеличение плотности олигохет (рис. 4). Это обусловлено тем, что на участках ручья с высоким уровнем загрязнения донные сообщества характеризуются монодоминантностью. В устье ручья в составе бентофауны доминировали личинки хирономид.

Среднегодовые величины плотности зообентоса в ручье Черемушном в фоновом районе (ст. 1) и в районе поступления стоков (ст. 2) существенно не отличались ($p>0,05$). По направлению от района поступления сточных вод алюминиевого производства (ст. 2) к району 500 м ниже поступления стоков (ст. 3) плотность бентофауны резко увеличилась (численность - в 10 раз, биомасса – в 6 раз) ($p<0,05$) (рис. 5).

Снижение плотности зообентоса отмечали в направлении от станции 3 к станции 4 ($p<0,05$): численности - в 3 раза, биомассы - в 2 раза (см. рис. 5). Плотность бентофауны р. Енисей (ст. 5, 6) в среднем за исследованный период (1998-2000 гг.) в направлении от района 500 м выше устья ручья Черемушного (ст.5) к району 500 м ниже устья ручья Черемушного (ст. 6) увеличилась в 2-2,5 раза (см. рис. 5) за счет развития в районе ст. 6 личинок двукрылых и амфипод (см. рис. 4).

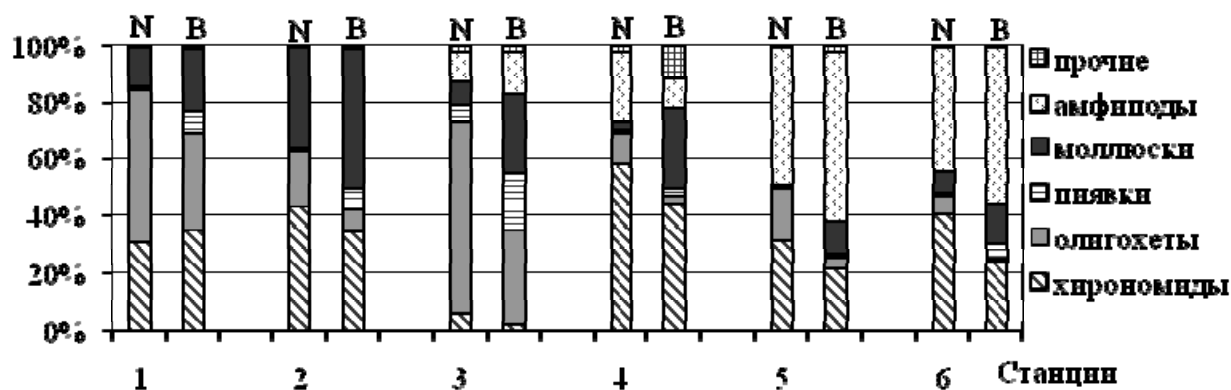


Рис. 4. Пространственная динамика численности (N, %) и биомассы (B, %) основных групп зообентоса ручья Черемушного (ст. 1- 4) и р. Енисей (ст. 5, 6) июнь-август 1998, 2000 гг., июль 1999 г.

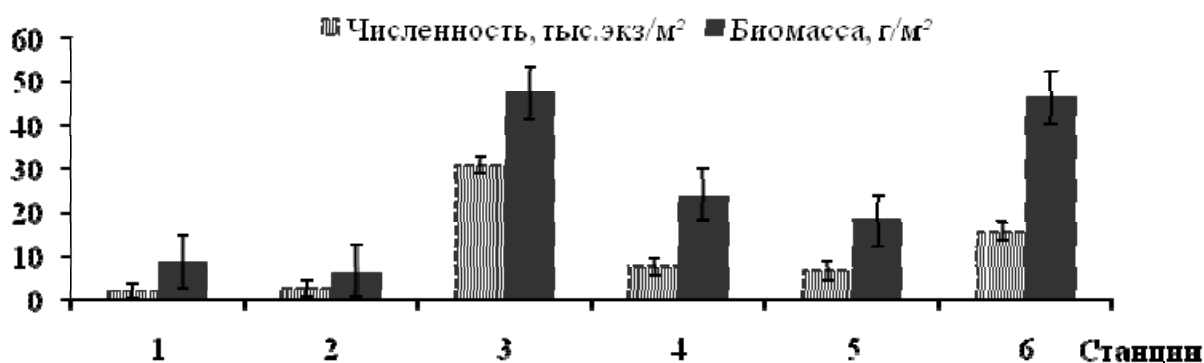


Рис. 5. Пространственная динамика численности и биомассы зообентоса ручья Черемушного (ст. 1 - 4) и р. Енисей (ст. 5, 6) июнь-август 1998, 2000 гг., июль 1999 г.

Пространственная динамика продукции и трат на обменные процессы зообентоса соответствовала динамике численности и биомассы. Наибольшие величины продукции ($0,40 \pm 0,35$ ккал/м²сутки) и деструкции ($1,79 \pm 1,00$ ккал/м²сутки) органического вещества зообентосом отмечены на участке ручья Черемушного, 500 м ниже поступления стоков алюминиевого завода (ст. 3). Это указывало на интенсивные процессы самоочищения бентонтами в этом районе ручья.

Глава 4. Оценка качества воды по структурным характеристикам зообентоса

Качество воды и трофический статус Красноярского водохранилища. Значения олигохетного индекса Гуднайта и Уитлея (G, %) по акватории водохранилища варьировали от 9,5% (Усть-Абаканский плес) до 100% (Приплотинный плес). В верхнем районе Красноярского водохранилища, принимающем оформленные стоки гидролизного завода, отношение средней численности олигохет ($0,04 \pm 0,02$ тыс.экз/м²) к средней численности зообентоса ($0,98 \pm 0,19$ тыс.экз/м²) было минимально по всему водохранилищу; качество воды по олигохетному индексу (G = 9,5%) соответствовало I классу, вода «очень чистая». В средний и нижний районы Красноярского водохранилища оформленные стоки промышленных предприятий

не поступали, однако на плесах средней и нижней частей водоема по численности в составе бентофауны преобладали олигохеты ($N_{\text{общая}}=0,37-0,60$ тыс.экз/м²; $N_{\text{олигохет}}=0,26-0,50$ тыс.экз/м²). Качество воды по олигохетному индексу в этих районах за весь период исследования соответствовало VI классу, «очень грязным» водам ($G=70-100\%$).

Таким образом, по олигохетному индексу отмечено ухудшение состояния воды в Красноярском водохранилище в направлении от Усть-Абаканского плеса к Приплотинному плесу (вода «очень чистая»→вода «очень грязная»).

Индекс Балушкиной (K), основанный на соотношении численности подсемейств личинок хирономид, в период 2001-2005 гг. по акватории водохранилища варьировал от 2,06 (Усть-Абаканский плес) до 11,5 (Приплотинный плес). В направлении от Усть-Абаканского плеса к Приплотинному доля личинок хирономид п/сем. *Chironominae* изменялась незначительно (88-98%), доля личинок п/сем. *Tanyptodinae* увеличилась от 0 до 65%, доля личинок п/сем. *Orthocladiinae* – снизилась с 12% до 5%. По индексу Балушкиной отмечено ухудшение состояния воды в Красноярском водохранилище в направлении от Усть-Абаканского плеса к Приплотинному плесу (вода «умеренно-загрязненная»→вода «грязная»). Таким образом, индексы Гуднайта и Уитлея, Балушкиной дали одинаковые оценки качества воды в нижнем районе Красноярского водохранилища, в верховье – значительно различаются: от градации вода «очень чистая» до градации «умеренно-загрязненная».

Биотический индекс Вудивисса по донным сообществам (BJ , балл) Красноярского водохранилища рассчитан по модифицированной таблице разработанной З.Г.Гольд, С.П.Шулепиной (2008), с использованием материалов данной диссертации. За период исследований (2001-2005 гг.) в составе бентофауны Красноярского водохранилища число индикаторных групп зообентоса варьировало от 14 (Усть-Абаканский плес) до 2 (Приплотинный плес). По биотическому индексу отмечено ухудшение состояния воды Красноярского водохранилища от Усть-Абаканского плеса ($BJ=4,10\pm 0,03$ балла) к Приплотинному плесу ($BJ=1,8\pm 1,0$ балла) (вода «загрязненная»→вода «грязная»).

Оценку качества воды проводили по индексу сапробности. В составе зообентоса Красноярского водохранилища за исследованный период (2001-2005 гг.) зарегистрировали 54 вида с известной индивидуальной сапробностью (72% от общего числа видов): из них β -мезосапробов – 39 видов, α -мезосапробов – 8, олигосапробов – 4, полисапробов – 3. При изучении качества вод на отдельных участках Красноярского водохранилища за весь исследуемый период прослеживалась тенденция возрастания индекса сапробности в пространственном аспекте (по оси водоема от верховья к плотине). По индексу сапробности при незначительной его вариации отмечена тенденция ухудшения состояния воды Красноярского водохранилища от Усть-Абаканского плеса ($S=2,22\pm 0,10$ балла) к Приплотинному плесу ($S=2,94\pm 0,47$ балла) (вода «умеренно-загрязненная»→вода «загрязненная»). Это обусловлено тем, что на глубинах более 40 м (глубина Приплотинного плеса – более 70 м) структурообразующий комплекс формировали монокультуры олигохет *Limnodrilus hoffmeisteri* и *Tubifex tubifex* с высокими индивидуальными индексами сапробности (3,6-3,7 балла).

Таким образом, вода в районе Усть-Абаканского плеса, куда поступают производственные и сточные воды с очистных сооружений, по индексу Балушкиной оценена на уровне градации «умеренно-загрязненная», по индексу Гуднайта и

Уитлея - на уровне градации «чистая». По модифицированному индексу Вудивисса и индексу сапробности вода в этом районе водохранилища оценена на уровне градации «умеренно-загрязненная» и «загрязненная». В нижнем районе водохранилища вода по всем индексам оценена от уровня «загрязненная» до уровня «очень грязная». По всем рассчитанным индексам отмечено ухудшение качества воды Красноярского водохранилища в направлении от верхнего района к нижнему.

По модальным величинам численности зообентоса с выделением экологических модификаций (элементы экологического регресса) состояние экосистемы Красноярского водохранилища оценивалось как удовлетворительное.

Трофность вод в 2001-2005 гг. в оценке по биомассе зообентоса (по классификатору Китаева, 1984) соответствовала I - II классам предельно низкой и очень низкой кормности олиготрофного типа.

Качество воды прудов-отстойников, принимающих сточные воды фармацевтического производства и прилежащего района р. Енисей. В пруду-отстойнике, где отмечены высокотоксичные эффекты, и в р. Енисей зарегистрирована небольшая численность олигохет по сравнению с общей численностью зообентоса, и в большинстве случаев вода исследуемых районов по методу Гуднайта-Уитлея соответствовала «чистым» водам ($G=20-30\%$).

По средним величинам индекса Балушкиной качество воды в водной системе «пруды-отстойники – р. Енисей» оценено на уровне градации «чистая» ($K=0,43-1,02$). Возможно, что по этому индексу оценка качества воды всего района исследования завышена. Так, в районе поступления сточных вод фармацевтического производства в пруд-отстойник, где зарегистрированы высокотоксичные эффекты, численность п/сем. личинок хирономид составила: *Chironominae* (0,55 тыс.экз/м², 64%) / *Tanypodinae* (0) / *Orthocladinae* (0,09 тыс.экз/м², 36%) и качество воды оценивалось на уровне градации «чистая».

Анализ качества воды прудов-отстойников и прилежащего района р. Енисей по модифицированному биотическому индексу Вудивисса показал, что в пруду-отстойнике за весь период исследований (1998-2000 гг.) число индикаторных групп зообентоса варьировало от 8 до 12 групп. По величинам биотического индекса ($BJ=2,73\pm 0,17$ балла) качество воды оценено на уровне V класса, вода «грязная». В составе бентофауны в устьевом районе прудов-отстойников отмечено от 3 до 13 индикаторных групп и по величине биотического индекса ($BJ=5,6\pm 0,6$ балла), вода соответствовала III классу качества «умеренно-загрязненная». В р. Енисее, 500 м выше и ниже устья прудов-отстойников в составе зообентоса зарегистрировано от 3 до 16 индикаторных групп, состояние воды по биотическому индексу ($BJ=5,4-6,3$ балла соответственно районам) не отличалось и соответствовало III классу качества, вода «умеренно-загрязненная». Таким образом, по модифицированному биотическому индексу зарегистрировано улучшение качества воды водной системы «пруды-отстойники - р. Енисей» в направлении от зоны поступления сточных вод фармацевтического производства (вода «грязная») к устью прудов-отстойников и в р. Енисей (вода «умеренно-загрязненная»).

В составе зообентоса прудов-отстойников и прилежащего района р. Енисей за исследованный период (1998-2000 гг.) зарегистрировано 50 видов с известной индивидуальной сапробностью (62% от общего числа видов): из них β -мезосапробов – 29 вида, α -мезосапробов – 14, олигосапробов – 4, полисапробов – 3. По индексу

сапробности зарегистрировано улучшение качества воды водной системы «пруды-отстойники - р. Енисей» в направлении от зоны поступления сточных вод фармацевтического производства ($S=2,91\pm 0,16$ балла) к району р. Енисей, 500 м ниже устья прудов-отстойников ($S=2,38\pm 0,07$ балла): вода «загрязненная» → вода «умеренно-загрязненная».

Качество воды ручья Черемушного и прилегающего района р. Енисей. По олигохетному индексу Гуднайта и Уитлея в ручье Черемушном в направлении от условно фонового района ($G=63\%$, вода «загрязненная»), к району поступления сточных вод алюминиевого производства в ручей отмечено улучшение качества воды ($G=26\%$, вода «чистая»). В районе 500 м ниже поступления стоков в ручей Черемушный состояние воды оценено градацией «очень грязная» ($G=86\%$), к устью ручья отмечено улучшение качества воды до градации «очень чистая» ($G=8\%$). В р. Енисее, 500 м выше и ниже устья ручья качество воды по олигохетному индексу ($G=38-5\%$) существенно различилось (вода «умеренно-загрязненная» → вода «очень чистая»). По индексу Гуднайта и Уитлея оценка качества воды в районе поступления сточных вод, где зарегистрированы высокотоксичные эффекты, не корректна, так как олигохеты имели невысокую плотность, их доля не превышала 26% и вода оценена на уровне градации «чистая».

По индексу Балускиной отмечено улучшение качества воды в ручье Черемушном от условно фонового района ($K=1,19\pm 0,46$; вода «умеренно-загрязненная») к району поступления сточных вод алюминиевого производства ($K=0,35\pm 0,16$; вода «чистая») и ухудшение состояния воды к устью ручья ($K=5,78\pm 0,40$; вода «загрязненная»). Это указывает на то, что оценка качества воды в ручье Черемушном по индексу Балускиной завышена. Так, в районе поступления сточных вод, где зарегистрированы высокотоксичные эффекты, в составе хирономид преобладали ортокладины и качество воды оценили на уровне градации «чистая».

Исследования качества воды ручья Черемушного и прилегающего района р. Енисей по модифицированному биотическому индексу Вудивисса показали, что в ручье Черемушном за весь период исследований (1998-2000 гг.) число индикаторных групп зообентоса варьировало от 1 (район поступления сточных вод в ручей Черемушный) до 17 (устье ручья Черемушного). По биотическому индексу отмечено ухудшение состояния воды в ручье Черемушном от условно фонового района ($VJ=2,2\pm 0,1$ балла; вода «грязная») к району поступления сточных вод алюминиевого производства ($VJ=1,00\pm 0,01$ балла; вода «очень грязная») и улучшение качества воды к устью ручья ($VJ=4,0\pm 0,2$ балла; вода «загрязненная»). В р. Енисей, выше и ниже устья ручья Черемушного число индикаторных групп зообентоса не превышало 8 и состояние воды по донным беспозвоночным оценено на уровне вода «загрязненная» ($VJ=3,8-3,7$ балла).

В составе зообентоса данного района за исследованный период зарегистрировано 54 вида с известной индивидуальной сапробностью (64% от общего числа видов); из них β -мезосапробов – 38 видов, α -мезосапробов – 11, олигосапробов – 2, полисапробов – 3. Качество воды ручья Черемушного от зоны выше поступления сточных вод алюминиевого производства в ручей Черемушный ($S=3,10\pm 0,23$ балла) к устью ручья ($2,51\pm 0,04$ балла) и в р. Енисей, выше и ниже устья ручья ($S=2,51-2,64$ балла) соответствовало IV классу качества, градации «загрязненная». Отсутствие различий в качестве воды по данному индексу между зоной поступле-

ния сточных вод в ручей Черемушный и зонами, которые расположены выше и ниже этого района, скорее всего, обусловлено некорректными величинами индивидуальной сапробности видов, учитывающих преимущественно уровень органического загрязнения. Индикаторность донных сообществ на уровне объективных оценок качества вод может быть повышена включением сапротоксобного анализа.

Сравнительный анализ оценок качества воды по донным сообществам водных объектов бассейна р. Енисей. Метод Гуднайта и Уитлея, основанный на учете отношения численности олигохет к численности всех донных организмов, не показателен при оценке качества вод бассейна р. Енисей. Так, в пруду-отстойнике, в ручье Черемушном и в верховье Красноярского водохранилища (в районах поступления сточных вод, где зафиксированы высокотоксичные эффекты) олигохеты имели небольшую плотность (0,73-0,74 тыс.экз/м²), их доля не превышала 30% и, соответственно, качество воды оценено II классом, вода «чистая» (табл. 6).

Таблица 6 - Оценка качества вод водных объектов бассейна р. Енисей по сообществам донных животных

Показатель	Красноярское водохранилище		Пруды-отстойники		Ручей Черемушный	
	Усть-Абаканский плес	Приплотинный плес	Поступление стоков	Р. Енисей	Поступление стоков	Р. Енисей
Индекс загрязнения вод (Гусева, 2000) класс качества воды	1.72±0.02 (III)	2.80±0.01 (IV)	1.42±0.20 (III)	4.30±1.20 (V)	17.7±3.41 (VII)	1.70±0.05 (III)
Олигохетный индекс (G,%), класс качества воды	9.5 I	96.0 VI	30.0 II	32.0 II	26.0 II	5.1 I
Индекс Балускиной (K), класс качества воды	2.06 III	11.50 V	1.02 II	0.43 II	0.35 II	1.54 III
Биотический индекс в нашей модификации ВJ, балл класс качества воды	4.10±0.03 IV	1.80±1.00 V	2.73±0.17 V	5.90±0.31 III	1.00±0.01 VI	3.80±0.01 IV
Индекс сапробности (S, балл), класс качества воды	2.22±0.10 III	2.94±0.47 IV	2.91 ±0.16 IV	2.38±0.07 III	3.09±0.31 IV	2.64±0.09 IV
Тест-объект Ceriodaphnia affinis, степень токсичности (Гольд, Морозова и др., 2004)	токсичные	токсичные	токсичные	не токсичные	токсичные	токсичные
Индекс сапротоксобности (St, балл), класс качества воды	2.80±0.20 IV	3.50±0.20 V	3.34±0.11 V	2.86±0.05 IV	3.61±0.13 V	3.03±0.09 IV-V

В то же время, в среднем и нижнем районах Красноярского водохранилища получена противоположная картина: численность олигохет по районам водохранилища была велика ($N_{\text{средний р-н}}$ -0,38 тыс.экз/м²; $N_{\text{нижний р-н}}$ -0,19 тыс.экз/м²), и олигохетный индекс был высок (70-100%), вода соответствовала грациям «грязная» - «очень грязная». Эти оценки качества воды обусловлены специфическими условиями профундали на глубинах более 40 м (низкое содержание кислорода, низкие температуры, иловые грунты с высоким содержанием разлагающийся органики

(например: Гольд, 2008г)), где донные сообщества представлены монокультурами олигохет. Из вышеизложенного следует, что олигохетный индекс не следует применять на объектах, где есть токсическое загрязнение, и на глубоководных водохранилищах, в частности, бассейна р. Енисей.

Индекс Балушкиной рассматривается как один из перспективных методов оценки качества вод (Руководство по методам..., 1983). Исходя из полученных нами индексов ($K = 2,06 - 11,5$) качество воды всех районов Красноярского водохранилища соответствовало градациям «умеренно-загрязненная» - «грязная». На большей части бентали Красноярского водохранилища личинки хирономид встречаются единично, так как их развитие ограничено глубиной водоема (с глубины более 40 м вылет имаго из куколок практически невозможен), поэтому, рассчитанный здесь хирономидный индекс слабо репрезентативен.

В водной системе «пруды-отстойники - р. Енисей» и в ручье Черемушном (в районах поступления сточных вод, где зарегистрированы высокотоксичные эффекты) в составе хирономид преобладали ортокладины и качество воды оценивалось высокой градацией вода «чистая» (см. табл. 6). Эти оценки явно завышены и не соответствуют действительности. Известно, что некоторые группы хирономид устойчивы к токсическим загрязнениям, в частности ортокладины, которые в хирономидном индексе являются показателями «чистой» воды. Таким образом, на водных объектах бассейна р. Енисей, принимающих промышленные сточные воды с содержанием поллютантов комплексной природы этот индекс не показателен.

По модифицированному для водных объектов бассейна р. Енисей биотическому индексу Вудивисса оценка качества воды исследованных разнотипных водных объектов имела четко выраженную пространственную динамику, очевидно соответствующую реальной ситуации. Так, в Красноярском водохранилище от верхних плесов к нижним зарегистрировано ухудшение качества воды от IV класса к VI; в водной системе «пруды-отстойники – р. Енисей» от района поступления сточных вод фармацевтического производства к району р. Енисей ниже устья прудов-отстойников отмечено улучшение качества воды с V до III класса; в ручье Черемушный, от района поступления сточных вод алюминиевого производства к району р. Енисей ниже устья ручья зарегистрировано улучшение качества воды от VI класса к IV.

По индексу сапробности оценка качества воды исследованных водных объектов бассейна р. Енисей имела сглаженную динамику: все районы Красноярского водохранилища отнесены к IV классу качества, кроме Усть-Абаканского плеса – III класс качества; в системе «пруды-отстойники – р. Енисей» от района поступления сточных вод к району р. Енисей ниже устья прудов-отстойников отмечено улучшение качества воды на одну градацию, с IV на III класс; в ручье Черемушный от района поступления сточных вод к району р. Енисей ниже устья ручья качество воды не изменилось (IV класс). Очевидно, на сглаженность полученных оценок повлияло наличие токсичности вод, искажающих оценку реальной ситуации по сапробному анализу, разработанному только для органического загрязнения.

Обоснование для введения индекса сапротоксобиности. Красноярское водохранилище принимает поллютанты органической и неорганической природы. По всей акватории водохранилища за период мониторинговых исследований зарегистрированы (Гольд, 2008 г): во-первых, высокое загрязнение вод в оценках, как по элементному химическому составу, так и по величинам индекса загрязнения вод

(ИЗВ=1,7 – 2,8), по которому качество воды в период 2001-2005 гг. соответствовало 3-4 классам «загрязненной» и «грязной» категориям; во-вторых, токсичность вод в оценках по реакциям биотестов (светящиеся бактерии, парамеции, водоросли, рачки).

Отмеченные ситуации свидетельствовали о том, что более корректными оценками качества воды могут быть те, которые учитывали интегральные реакции организмов на воздействие всего комплекса химических ингредиентов органической и неорганической природы. Таким условиям хорошо удовлетворяет сапротоксобный анализ через индекс сапротоксобности (St). Обоснование и результат его включения в схему оценок качества воды водотоков и водоемов бассейна р. Енисей проведены с представлениями списков индивидуальной сапротоксобности видов. Уточнение индикаторной значимости массовых видов основано на учете их интегральной реакции на смешанное загрязнение (органической и неорганической природы), совокупности сапробных и токсобных условий, формирующихся в водной среде, и встречаемости в экспериментальных участках.

Впервые на водных объектах бассейна р. Енисей схема сапротоксобного анализа была апробирована на специфической водной системе «ручей Черемушный - р. Енисей», загрязненной стоками алюминиевого производства, и в дальнейшем применена к экосистемам «прудов-отстойников - р. Енисей» и Красноярского водохранилища. Схема сапротоксобного анализа учитывала структуру планктонных и донных сообществ, реакции тест-объектов (рачки *Ceriodaphnia affinis*), уровни биологически безопасного разбавления, результаты сравнения численности видов-доминантов, долей доминантов по численности, индекс разнообразия Шеннона, индексы общей и индивидуальной сапробности. Таким образом, она учитывала многие показатели природных сообществ, токсические эффекты, а также химический состав вод, выраженный индексом загрязнения вод (ИЗВ). Разработан список видов донных сообществ с введенными величинами их индивидуальной сапротоксобности для всех исследованных объектов. Основу расчета сапротоксобности (St) составляла модифицированная формула расчета сапробности Пантле и Букка (Яковлев, 1988) с использованием величин индивидуальной сапротоксобности видов и их численности в исследуемых водных объектах.

В качестве одного из критериев определения величин индивидуальной сапротоксобности использована коррелятивная связь численности отдельных видов бентонтов с разными дескрипторами качества вод: коэффициентом токсичности, общей сапробностью донного сообщества, с ИЗВ и т.д. Средняя и высокая сопряженность анализируемых признаков ($\eta=0,57-0,73$) использовалась как критерий обоснования введения модифицированных величин индивидуальной сапротоксобности видов.

В ручье Черемушном и прилежащем к нему району р. Енисей для донных сообществ были рассчитаны новые индивидуальные сапротоксобности у 34% видов. У 17% видов бентонтов индекс сапротоксобности превысил индекс сапробности, у 49% видов индекс сапротоксобности равен индексу сапробности.

За период 1998-2000 гг. индекс сапротоксобности варьировал по районам ручья Черемушного от $3,00 \pm 0,34$ баллов, IV класс качества воды (район выше поступления сточных вод) до $3,61 \pm 0,13$ баллов, V класс качества (район поступления сточных вод алюминиевого производства). Качество воды р. Енисей соответствовало IV-V классам ($St=3,00-3,12$ баллов). В целом, унификация экспертных оценок по

зообентосу через индивидуальные индексы сапротоксности повысила адекватность итоговых оценок по классам качества воды.

Сравнение оценок качества вод ручья Черемушного в районе поступления сточных вод по индексу сапробности ($S=3,09$ балла, IV класс, вода «загрязненная»), индексу сапротоксности ($St=3,61$ балла, V класс, вода «грязная»), по биотическому индексу ($BJ=1,0$ балл, VI класс, вода «очень грязная») позволили построить следующий ранжированный ряд дескрипторов оценок качества воды (от лучшего качества к худшему): $S \rightarrow St \rightarrow BJ$.

В водной системе «пруды-отстойники – р. Енисей» индекс сапротоксности в среднем за период исследований 1998-2000 гг. варьировал от $3,34 \pm 0,11$ балла, V класс качества воды (район поступления сточных вод) до $2,86 \pm 0,05$ баллов, IV класс качества (р. Енисей, 500 м ниже устья прудов-отстойников).

Сравнение оценок качества вод водной системы «пруды-отстойники – р. Енисей» в районе поступления сточных вод по индексу сапробности ($S=2,91$ балла, IV класс, вода «загрязненная»), индексу сапротоксности ($St=3,34$ балла, V класс, вода «грязная»), по биотическому индексу ($BJ=2,73$ балла, V класс, вода «грязная») позволило построить следующий ранжированный ряд дескрипторов оценок качества воды (от лучшего качества к худшему): $S \rightarrow St \rightarrow BJ$.

В ручье Черемушном, прудах-отстойниках и р. Енисей, где доминируют поллютанты неорганической природы, более целесообразно использовать сапротоксный анализ качества вод и модифицированный биотический индекс. Индексы сапротоксности более корректны в сравнении с индексом сапробности, поскольку их значения определяются результатами конкретных токсикологических экспериментов, результатами анализов элементного химического состава вод. Когда в водных объектах преобладают органические поллютанты, достаточно вести оценку качества воды по индексу сапробности.

За период 2001 – 2005 гг. индекс сапротоксности варьировал по районам водохранилища от $2,50 \pm 0,20$ баллов (верхний район) до $3,3 \pm 0,12$ баллов (нижний район), в том числе на Краснотуранском плесе в пределах 2,6-3,0 баллов, на Приплотинном – 3,3-3,7 баллов. Качество воды закономерно ухудшалось от верхнего района (IV класс, вода «загрязненная») к среднему (IV-V класс, вода «загрязненная - грязная») и нижнему (V класс, вода «грязная»).

Сравнение оценок качества воды по районам Красноярского водохранилища по индексу сапробности ($S=3,07$ балла, IV класс, вода «загрязненная»), индексу сапротоксности ($St=2,90$ балла, IV-V класс, вода «средней, высокой токсичности»), по биотическому индексу ($BJ=1,90$ балла, вода «грязная») позволили построить ранжированный ряд дескрипторов по степени снижения оценок качества воды: $S \rightarrow St \rightarrow BJ$.

Таким образом, в глубоководном Красноярском водохранилище более объективное заключение о качестве воды по макрозообентосу за период 2001-2005 гг. получено по модифицированной схеме расчета биотического индекса Вудивисса; индексу сапротоксности и модальным величинам численности зообентоса с выделением экологических модификаций (элементы экологического регресса).

Тесная положительная связь ($r=0,81 \pm 0,04$) между индексом сапротоксности и индексом Вудивисса, рассчитанным по модифицированной схеме свидетельствует о высоком уровне совпадения оценок качества воды по исследованным водным объектам.

ВЫВОДЫ

1. В составе бентофауны исследованных водных объектов зарегистрировано 142 вида донных беспозвоночных, из них: в Красноярском водохранилище (2001-2005 гг.) - 74 вида, в системе «пруды-отстойники – р. Енисей (1998-2000 гг.) – 81 вид, в ручье Черемушном (1998-2000 гг.) – 83 вида. Видовое разнообразие было минимальным в Красноярском водохранилище ($H=0,71\pm 0,11$ бит), максимальным – в ручье Черемушном ($H=1,69\pm 0,14$ бит). Общими для изучаемых водных объектов отмечены 39% видов, наибольшая встречаемость отмечена у олигохет *Tubifex tubifex*, *Limnodrilus hoffmeisteri*, личинок хирономид *Cricotopus silvestris*, *Chironomus plumosus*.

2. Максимальная плотность бентофауны зарегистрирована в ручье Черемушный ($11,01\pm 4,43$ тыс.экз/м², $25,27\pm 7,34$ г/м²), минимальная - в Красноярском водохранилище ($0,59\pm 0,05$ тыс.экз/м², $0,81\pm 0,06$ г/м²). В пространственной динамике плотности зообентоса (по средним величинам за период исследования) зафиксировано: в Красноярском водохранилище снижение численности и биомассы от верхнего района к нижнему; в системе «пруды-отстойники – р. Енисей» снижение плотности (в 3-8 раз) зообентоса от района поступления сточных вод к району р. Енисей; в ручье Черемушном и р. Енисей увеличение плотности (в 3-6 раз) от района поступления сточных вод к району р. Енисей. Для всех трех объектов характерно существенное изменение видового состава бентофауны в пространственном аспекте.

3. Индексы, учитывающие соотношение крупных таксонов (класс олигохет, подсемейства личинок хирономид) донных сообществ, занижают качество воды в Красноярском водохранилище (до уровня вода «грязная – очень грязная»), завышают - в пруду-отстойнике и в ручье Черемушном, принимающих производственные сточные воды (до уровня вода «чистая»).

4. Биотические индексы Вудивисса, рассчитанные по модифицированной схеме из 17 индикаторных групп-таксонов, и сапротоксобные индексы, рассчитанные по региональным величинам индивидуальной сапротоксобности видов, дают объективно дифференцируемую оценку динамики качества вод с учетом районов поступления сточных вод (IV - VI классы качества) и анализируемых участков р. Енисей (III – IV классы).

5. Состояние экосистемы Красноярского водохранилища по модальным величинам численности зообентоса с выделением экологических модификаций по длительному ряду мониторинга оценивается как удовлетворительное.

6. Рекомендовано оценку качества воды по донным сообществам водных объектов бассейна р. Енисей проводить по следующей схеме: экологические модификации по численности зообентоса (при наличии длинных рядов наблюдений); модифицированная схема расчета биотического индекса Вудивисса; индекс сапротоксобности, по региональным величинам индивидуальной сапротоксобности видов; индекс сапробности, при преобладающем поступлении органических веществ.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гольд З.Г., Глущенко Л.А., Морозова И.И., Шулепина (Тропина) С.П., Дугина Е.Н., Шадрин И.А. Разработка принципов комплексной биологической оцен-

ки качества вод бассейна Енисея. Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов // Тез. докл. Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием, Ч. 2. Красноярск: Краснояр. гос. технич. ун-т. 1999. С. 137.

2. Шулепина (Тропина) С.П. Донные сообщества в оценке качества воды водотока (на примере ручья Черемушного) // Экология и рациональное природопользование на рубеже веков. Итоги и перспективы: материалы международной конференции 14 – 17 марта 2000 г. Т. II. Томск: изд-во ТГУ. 2000. С. 115.

3. Gold Z.G., Anufrieva T.N., Muchkina E.Y., Kozhevnicova N.A., Kuznezova O.A., Shulepina (Tropina) S.P. The dynamics of structural characteristics of the biota of the ecosystem in the Krasnoyarsk deep - water reservoir (1977 - 1999) // Biodiversity and dynamics of ecosystems in North Eurasia, Vol. 5. Novosibirsk: Russian Academy of Sciences Siberian Branch. 2000. P. 125 – 127

4. Гольд З.Г., Глущенко Л.А., Морозова И.И., Шулепина (Тропина) С.П., Шадрин И. А. (а). Анализ качества воды системы «ручей Черемушный - река Енисей» по унифицированному классификатору химических и биологических дескрипторов // Проблемы использования и охраны природных ресурсов Центральной Сибири. Вып. 3. Красноярск: КНИИГиМС. 2001. С. 85 – 96.

5. Гольд З.Г., Глущенко Л.А., Морозова И.И., Шулепина С.П. и др. (б). Взаимосвязь показателей качества воды по природным водным сообществам // Тез. докл. VIII съезда гидробиол. об-ва РАН. Калининград: Атлантиро. 2001. Т. 2. С. 119-120.

6. Гольд З.Г., Глущенко Л.А., Морозова И.И., Шулепина С.П., Шадрин И.А. Взаимосвязь нормативных характеристик качества воды по дескрипторам биоиндикации и биотестирования (на примере водных объектов бассейна Енисея) // Современные проблемы водной токсикологии. Тез. докл. Всероссийской конференции с участием специалистов из стран ближнего и дальнего зарубежья, 19-21 ноября. Борок: Ин-т биологии внутренних вод. 2002. С. 137-138.

7. Шулепина С. П. Оценка влияния сточных вод АО «Красфарма» на качество воды р. Енисея по организмам зообентоса. Вестник КрасГУ. 2003. С. 97-106.

8. Гольд З.Г., Глущенко Л.А., Морозова И.И., Шулепина (Тропина) С.П., Шадрин И. А. Анализ качества вод по химическим и биологическим показателям: пример классификации показателей для водной системы ручей Черемушный - река Енисей» // Водные ресурсы. 2003. Т. 30, №3. С. 335-345.

9. Гольд З.Г., Глущенко Л.А., Морозова И.И., Шулепина (Тропина) С.П., Шадрин И. А. Межгодовая динамика биологических показателей в оценке качества воды и структуры экосистемы глубоководного водоема (на примере Красноярского водохранилища) // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды. Материалы II научной конференции 22-26 сентября 2003 г. Минск – Нарочь. Минск: БГУ. 2003. С.115-117.

10. Гольд З.Г., Глущенко Л.А., Морозова И.И., Шулепина (Тропина) С.П., Шадрин И. А. Комплексная оценка качества воды и состояния водных экосистем по результатам биоиндикации и биотестирования на региональной основе // Сборник по материалам второй международной конференции Биотехнология – охране окружающей среды (часть I). Москва: Спорт и Культура. 2004. С. 42-47.

11. Гладышев М.И., Сущик Н.Н., Андрианова (Москвичева) А.В., Махутова О.Н., Калачева Г.С., Шулепина С.П. Запасы и потенциальная продукция незаменимых полиненасыщенных жирных кислот зообентоса Енисея. // Доклады АН. 2004. Т. 394, № 1. С. 133-135.

12. Гольд З.Г., Глущенко Л.А., Морозова И.И., Шулепина С.П., Шадрин И.А., Глазков А.Е. (а). Взаимосвязь результатов биотестирования, биоиндикации и химического анализа вод (на примере р. Кача бассейна Енисея) // Современные проблемы водной токсикологии: Тез. докладов международной конференции, посвященной памяти доктора биологических наук, профессора Б. А. Флерова. Борок: Ин-т биологии внутренних вод. 2005. С. 29-30.

13. Гольд З.Г., Глущенко Л.А., Морозова И.И., Шулепина С.П., Шадрин И.А., Глазков А.Е. (б). Качество воды реки Кача по биологическим (перифитон, макрозообентос, биотестирование) и химическим дескрипторам // Вестник КрасГУ. 2005. С. 137--146.

14. Гольд З.Г., Глущенко Л.А., Морозова И.И., Шулепина С.П., Шадрин И.А. (в). Биологические приемы оценки качества вод в разработках нормативов предельно допустимых вредных воздействий // Биотехнология, экология, охрана окружающей среды. Сборник научных трудов. М: Изд-во ООО "Графикон-принт". 2005. С. 27-35.

15. Гольд З.Г., Глущенко Л.А., Морозова И.И., Шулепина С.П. (г). Технологии биологического контроля качества вод с учетом региональных принципов (на примере бассейна Енисея) // Сборник Научных записки Тернопольского педагогического университета им. В. Гнатюка. Серия: биология, специальный выпуск. Гидроэкология. Т. 3 (26). 2005. С. 90-92.

16. Шулепина С.П. Оценка качества воды глубоководного Красноярского водохранилища по донным беспозвоночным // Современное состояние водных биоресурсов: Материалы международной конференции. Новосибирск: «Агрос». 2008. С. 363-366.

17. Гольд З.Г., Шулепина С.П. (а). К оценке качества вод глубоководных водоемов по структуре донных сообществ (на примере Красноярского водохранилища) // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. ООО «Изд. «Орион»». № 12. 2008. С. 62-69.

18. Гольд З.Г., Скопцова Г.Н., Шулепина С.П., Агеев А.В. (б). Макрозообентос Красноярского водохранилища // Красноярское водохранилище: мониторинг, биота, качество вод: монография. Красноярск: СФУ. 2008. С. 189-230.

19. Шулепина С.П., Гольд З.Г. Распределение донных сообществ по профилю разных глубин глубоководного континентального водоема (на примере Красноярского водохранилища) // X Съезд Гидробиологического общества при РАН. Тезисы докладов (г. Владивосток. 28 сентября-2 октября 2009 г.). Владивосток: Дальнаука. 2009. С. 451.

Подписано в печать _____
Формат 60x84/16. Уч.-изд.л. 1,3
Тираж 100 экз. Заказ № 2526

Отпечатано полиграфическим центром БИК
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а.