

*М.В. Медведкиной*  
*Рис*

На правах рукописи



**Воробьев Данил Сергеевич**

**БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЧИСТКИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ  
ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ**

03.02.08 – Экология (биология)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора биологических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», на кафедре ихтиологии и гидробиологии.

**Научный консультант:** доктор биологических наук, профессор  
**Романов Владимир Иванович**

**Официальные оппоненты:**

**Карташев Александр Георгиевич**, доктор биологических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга, профессор

**Журавлев Валерий Борисович**, доктор биологических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный университет», кафедра зоологии и физиологии, профессор

**Морузи Ирина Владимировна**, доктор биологических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный аграрный университет», кафедра биологии, биоресурсов и аквакультуры, заведующая кафедрой

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии Уфимского научного центра РАН, г. Уфа

Защита состоится 18 декабря 2013 года в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.10, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (корпус НИИ ББ).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_» октября 2013 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат биологических наук, доцент



Просекина Елена Юрьевна



## ВВЕДЕНИЕ

Российская Федерация принадлежит к числу государств, наиболее обеспеченных водными ресурсами. Среднемноголетние возобновляемые водные ресурсы России составляют 10 % мирового речного стока (2 место в мире после Бразилии) и оцениваются в 4,3 тыс. км<sup>3</sup> в год. В Российской Федерации функционирует водохозяйственный комплекс, который является одним из крупнейших в мире и включает более 30 тыс. водохранилищ и прудов общим объемом свыше 800 км<sup>3</sup> и полезным объемом 342 км<sup>3</sup>. В водные объекты Российской Федерации сбрасывается до 52 км<sup>3</sup> в год сточных вод, из которых 19,2 км<sup>3</sup> подлежат очистке. Свыше 72 % сточных вод, подлежащих очистке (13,8 км<sup>3</sup>), сбрасываются в водные объекты недостаточно очищенными, 17 % (3,4 км<sup>3</sup>) – загрязненными без очистки и только 11 % (2 км<sup>3</sup>) – очищенными до установленных нормативов. (Водная стратегия ..., Распоряжение Правительства РФ № 1235-р).

Помимо колоссальных запасов поверхностных вод, Россия занимает одно из первых мест по запасам топливно-энергетического сырья. Сейчас в России разрабатывается более 700 нефтяных месторождений, расположенных в более чем 40 субъектах Российской Федерации. Наибольшие из них сосредоточены в Западной Сибири – 69 %, в Урало-Поволжье – 17 %, на Европейском Севере – 7,8 % и в Восточной Сибири – 3,6 %. Из субъектов РФ доминирующее положение занимает Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, в котором сконцентрировано более 50 % запасов нефти России.

Добыча и транспортировка углеводородов всегда сопровождается негативным воздействием на окружающую природную среду. Наиболее масштабные катастрофы характерны для морских перевозок углеводородов. Объемы нефтяных загрязнений в глобальном масштабе достигают 10–20 млн. т нефти в год (Иванов, Сидоров, 2011).

Огромное количество аварийных разливов нефти происходит на суше в местах добычи и на трубопроводных магистралях. По данным Гринпис, только в России ежегодно из разорванных труб проливается около 10 млн. т нефти (Собгайда и др., 2010). Нет ни одной нефтедобывающей компании, которая бы не сталкивалась с проблемами нефтяного загрязнения окружающей среды, в том числе и водных объектов. Приказом Минприроды России от 13 апреля 2009 года № 87 утверждена «Методика исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства»; размер таксы для исчисления размера вреда при загрязнении в результате аварий водных объектов нефтепродуктами составляет 0,5–3,0 млн. руб. за тонну пролитой нефти (Методика исчисления..., 2009).

Очистка водных объектов от нефти и нефтепродуктов является одной из самых сложных и трудоемких задач в аспекте ликвидации аварийных разливов нефти. Сложность очистки природных водных объектов связана с динамичной водной средой и разнообразием процессов трансформации нефти, которые происходят в воде. Наиболее развитыми являются технологии и средства сбора нефти и нефтепродуктов с поверхности водных объектов. Экономически приемлемые и экологически обоснованные технологии очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов на технологическом рынке представлены в минимальных количествах, а зачастую неприменимы в условиях природных водных объектов.

**Цель работы** – биологическое обоснование технологий ремедиации нефтезагрязненных донных отложений водных объектов.

**Для достижения поставленной цели предполагалось решить следующие задачи:**

1. Изучение процессов нефтяного загрязнения и трансформации нефти в водных объектах.
2. Изучение влияния нефти и нефтепродуктов на гидробионтов.
3. Исследование жизнедеятельности тубифицид в условиях нефтяного загрязнения для разработки биотехнологии очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов и научного обоснования ее применения.
4. Разработка комплексной технологии очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов, позволяющей активизировать процессы естественной биоремедиации водоемов.
5. Изучение процессов естественного восстановления гидрофауны водных объектов после проведения комплексной очистки от нефти.

**Защищаемые положения:**

1. Использование водных малощетинковых червей семейства тубифицид (на примере *Limnodrilus hoffmeisteri*) в очистке нефтезагрязненных донных отложений позволяет достоверно ускорить процессы деструкции нефти и нефтепродуктов.
2. Активизация процессов восстановления естественной гидрофауны водоемов является результатом комплексной очистки водных объектов от нефти и нефтепродуктов и достоверно отражается на характеристиках гидробионтов и их сообществ после проведения очистных работ.
3. Комплексные технологические решения очистки водных объектов от нефти и нефтепродуктов позволяют многократно снижать содержание нефти в донных отложениях, достигая уровней содержания нефти в 10-см слое донных отложений 70 мг/кг на песчано-илистых отложениях и 3300 мг/кг на илисто-детритных участках.

**Научная новизна.** Изучены процессы жизнедеятельности (выживаемость, перемещение, биотурбация, плодовитость) червей-тубифицид (на примере *Limnodrilus hoffmeisteri*) в условиях нефтяного загрязнения донных отложений. Исследовано влияние кислородного и температурного режимов на процессы деструкции нефти в присутствии лимнодрилусов. Предложен способ биологической очистки донных отложений с использованием червей-тубифицид (Воробьев и др., Патент РФ № 2357929).

Впервые исследован процесс естественного восстановления фауны нефтезагрязненных водоемов как результат реализации мероприятий по очистке донных отложений и воды от нефти и нефтепродуктов. Прослежена изменчивость количественных и качественных показателей гидробионтов (фито-, зоопланктон, макрозообентос, ихтиофауна) в процессе ремедиации нефтезагрязненных водных объектов (до и после очистки). Дано биологическое обоснование эффективности комплексной технологии очистки (включая донные отложения) водных объектов от нефти и нефтепродуктов.



Предложены технологии (Евразийский патент №009507; Патенты РФ № 2357929, 2381994) и устройства (Патенты РФ № 80693, 88688, 112217) для очистки водных объектов от нефти и нефтепродуктов, а также прибор для оценки качества донных отложений, загрязненных нефтью – аэрошуп (Патент РФ № 92541).

**Достоверность защищаемых положений** обеспечена применением стандартных гидроэкологических методик исследования, наличием доказательной базы с использованием математико-статистических критериев оценки достоверности полученных результатов.

**Практическая значимость.** Разработан «Способ биологической очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов» (Воробьев и др., Патент РФ № 2357929) с использованием водных малощетинковых червей. Изучены процессы жизнедеятельности тубифицид в условиях нефтяного загрязнения. Полученные научные данные по жизнедеятельности червей-тубифицид в условиях нефтяного загрязнения позволяют использовать предложенный способ биологической очистки для снижения остаточного содержания нефти и нефтепродуктов в водных объектах.

Разработана, экспериментально испытана на Заполярных водоемах (Республика Коми) и обводненных карьерах в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре и внедрена технология очистки воды и донных отложений от нефти и нефтепродуктов (Лушников, Фадеев, Воробьев, Патент Евразийский № 009507), позволяющая в течение 1–2 сезонов очистных работ приводить к активному естественному восстановлению фауны и флоры водоемов. Разработанная комплексная технология использовалась по заказу ООО «Лукойл-Коми» (2004–2006 гг.), ОАО «ТНК-Нягань» (2006–2007 гг.) для комплексной очистки водоемов от нефти и нефтепродуктов, а также имеет перспективы широкомасштабного внедрения на территории Российской Федерации и за ее пределами.

Разработаны технические устройства для очистки водных объектов от нефти:

- установка для очистки воды (Воробьев, Патент РФ № 80693);
- устройство для очистки толщи и придонных слоев воды от нефтяных загрязнений (Воробьев, Патент РФ № 88688);
- система очистки донных отложений водоемов от нефти и/или нефтепродуктов (Воробьев, Патент РФ № 2381994);
- устройство для сбора нефти и иных плавающих загрязнений с поверхности открытых водоемов (Воробьев, Патент РФ № 112217).

Разработано, испытано и внедрено «Устройство для оценки загрязненности донных отложений водной среды нефтью и нефтепродуктами (аэрошуп)» (Воробьев, Патент РФ № 92541).

**Апробация работы и публикации.** Основное содержание диссертационной работы и ее результатов достаточно полно отражено в 42 публикациях, в том числе 1 монография, 15 статей, опубликованных в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, 2 статьи в зарубежных и 1 статья в Российских научных журналах, 7 патентов (1 Евразийский патент и 6 патентов Российской Федерации), 1 учебное пособие, 3 статьи в сборниках научных трудов, 12 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций, симпозиумов, совещаний. Общий объем публикаций – 36,91 п.л., авторский вклад – 15,79 п.л.



*Результаты исследований по теме диссертации докладывались на международных, всероссийских, региональных конференциях в России и за рубежом:*

I Межрегиональном совещании «Экология пойм сибирских рек и Арктики» (Томск, 1999); Международной конференции «Экология и рациональное природопользование на рубеже веков. Итоги и перспективы» (Томск, 2000); Всероссийская конференция молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология на рубеже веков» (Томск, 2000); IV республиканской научной конференции «Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан» (Казань, 2000); Всероссийской конференции «Экобиотехнология: борьба с нефтяным загрязнением окружающей среды» (Пушино, Московская обл., 2001); Международной научной конференции «Разнообразие животного мира Беларуси: итоги изучения и перспективы сохранения» (Минск, 2001); III Научно-практической конференции «Экологические работы на месторождениях нефти Тимано-Печорской провинции. Состояние и перспективы» (Ухта, республика Коми, 2004); Научно-производственном форуме «Экологические проблемы и техногенная безопасность строительства, эксплуатации и реконструкции нефтегазопроводов. Новые технологии и материалы» (Томск, 2005); XV-й ежегодной конференции SETAC – Society of Environmental Toxicology and Chemistry (Лилль, Франция, 2005); IV Международном конгрессе по управлению отходами «Вэйстэк» (Москва, 2005); Международной конференции «Экологическое состояние континентальных водоемов Арктической зоны в связи с промышленным освоением северных территорий» (Архангельск, 2005); Всероссийской конференции «Биологические аспекты рационального использования и охраны водоемов Сибири» (Томск, 2006); Всероссийской конференции «Охрана окружающей среды на объектах нефтегазового комплекса» (Альметьевск, 2008); Всероссийской конференции «Охрана окружающей среды и промышленная безопасность на объектах нефтегазового комплекса» (Шепси, Краснодарский край, 2009); IV Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии» (Томск, 2009); Международной конференции «Экологическая безопасность в газовой промышленности» (Москва, 2009); Всероссийской технической нефтегазовой конференции по разведке и добыче (Москва, 2010); Научно-практической конференции «Современные вызовы при разработке месторождений нефти и газа Западной и Восточной Сибири» (Томск, 2011); Всероссийской конференции с международным участием «Водные экосистемы Сибири и перспективы их использования» (Томск, 2011).

**Структура и объем работы:** диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов и практических рекомендаций. Общий объем – 385 стр., включая 95 рисунков и 54 таблицы. Список литературы составляет 639 источников, в том числе 48 иностранных.

**Благодарности:** автор выражает глубокую благодарность всем, кто участвовал в процессах, имеющих отношение к формированию диссертационного исследования: своему научному консультанту, д.б.н., профессору НИ ТГУ В.И. Романову за важные консультации по диссертационной работе. Генеральному директору, Главному инженеру и Зам. Гендиректора по научной работе ООО «НТО «Приборсервис» С.В. Лушникову, В.Н. Фадееву и Ю.А. Франк за совместное



взаимовыгодное сотрудничество по разработке и экспериментальному испытанию технологических решений в области очистки водных объектов от нефти и нефтепродуктов; сотрудникам лаборатории гидробиологии и рыбоводства НИИ Биологии и Биофизики при НИ Томском госуниверситете к.б.н., заведующему лабораторией гидробиологии и рыбоводства В.К. Попкову, с.н.с. А.И. Рузановой за неоценимый вклад в формирование экологического мышления и понимание базовых основ эколого-гидрологических исследований водных экосистем; к.б.н. Л.В. Лукьянцевой и н.с. О.С. Голубых за определение организмов зоопланктона и фитопланктона и помощь в гидроэкологической оценке водных экосистем по биотическим показателям. К.б.н. М.Д. Туманову, Ю.А. Носкову за совместные работы по ихтиоиндикационным исследованиям Щучьих озер в Республике Коми. Всем сотрудникам кафедры ихтиологии и гидробиологии НИ ТГУ за многочисленные научные советы и поддержку при выполнении работ.

Автор благодарен своему учителю и коллеге, к.б.н., доценту кафедры ихтиологии и гидробиологии НИ ТГУ **Н.А. Залозному** за ценные советы по выполнению работы, за помощь в видовом определении водных олигохет, а также за неоценимую моральную поддержку при выполнении научно-прикладных исследований.

## **Глава 1. НЕФТЯНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

### **1.1 Источники поступления нефти в окружающую среду**

В разделе проведен анализ источников нефтяного загрязнения природных сред и оценены масштабы аварийных разливов нефти на основании литературных данных. Утечки нефти происходят в местах ее добычи и на участках трубопроводного транспорта углеводородов, вблизи нефтеперерабатывающих заводов, на территориях хранения нефти и нефтепродуктов (Марченко и др., 2007; Никонов, 2010; Мазлова и др., 2011). Источниками загрязнения почв, грунтовых вод, водных объектов нефтью и нефтепродуктами являются территории автозаправочных комплексов (Бракоренко, 2013), железнодорожные станции (Теплых, Саргсян, 2012), речные и морские нефтеналивные танкеры (Марченко и др., 2007), морские нефтегазовые сооружения (Кенжегалиев, 2008; Староконь, 2012).

### **1.2 Загрязнение водных объектов нефтью**

В разделе (5 подразделов) кратко описано состояние водных объектов в аспекте нефтяного загрязнения морей, омывающих Россию; описано состояние крупных речных бассейнов в регионах нефтедобычи. Нефть и нефтепродукты являются одним из основных загрязнителей поверхностных вод.

### **1.3 Трансформация нефти и нефтепродуктов в водных объектах**

В разделе (3 подраздела) рассмотрены процессы трансформации нефти и нефтепродуктов в водных объектах – морях и океанах, водотоках, водоемах. Рассмотрены основные процессы трансформации нефти в водных объектах: растекание, перенос, испарение, диспергирование, эмульгирование, седиментация, окисление, растворение и биодegradация.



#### **1.4 Аспекты нормирования нефти и нефтепродуктов в донных отложениях и оценка их качества по гидрохимическим показателям**

В разделе описаны исследования российских ученых, на основании которых в регионах Российской Федерации установлены нормативы содержания нефти и нефтепродуктов в донных отложениях – в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре, Ненецком автономном округе, Санкт-Петербурге. Указаны проблемные методические аспекты определения суммарной концентрации нефтепродуктов в природных объектах на загрязненных и фоновых участках водных объектов при установлении нормативов допустимого остаточного содержания нефти и нефтепродуктов в донных отложениях. Приведены исследования ученых в области нормирования и оценки загрязненности донных осадков нефтью по гидрохимическим и биоиндикационным показателям.

Описан предложенный прибор (устройство), позволяющее проводить экспресс-оценку степени нефтяного загрязнения донных отложений – *устройство для оценки загрязненности донных отложений водной среды нефтью и нефтепродуктами (аэроцип)* (Воробьев, Патент РФ №92541). Указаны преимущества устройства и перспективы его использования при очистке водных объектов от нефти.

## **Глава 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ**

### **2.1 Материал и методы экспериментальных лабораторных работ**

Во всех экспериментах использовали широко распространенный вид тубифицид – *Limnodrilus hoffmeisteri* Claparede, 1862. В качестве субстрата для червей использовался ил из озера, расположенного в пос. Меженювка (Томский район). Ил отбирался с глубины 2,0–2,5 м дночерпателем системы Петерсена. Далее ил процеживали через мельничный газ № 19 для удаления грубого детрита. Для «стерилизации» ила (уничтожения макробеспозвоночных животных, коконов олигохет и др.) его раскладывали в герметичные емкости-кюветы и в течение 5 ч выдерживали в термостате при температуре 70–72° С. Содержание органического вещества в иле – 13,2 %. Для взвешивания навесок червей, нефти использовались электронные весы марки «ВЛТЭ-500» с дискретностью отсчета 0,01 г. Навески ила взвешивались на электронных весах марки «KRUPS» (Германия) с дискретностью 1 г; навески минеральных удобрений и дрожжей на торсионных весах с дискретностью 1 мг. Измерение кислорода проводили оксиметром «HANNA instruments» HI 9143. Температура воды измерялась гидробиологическим ртутным термометром. В некоторых экспериментах проводилось кормление червей – брали 0,3 г воздушно-сухих дрожжей и заливали 100 мл дистиллированной воды. После набухания дрожжи тщательно перемешивали. Образовавшуюся суспензию отстаивали в течение 30 минут. В аквариумы добавляли надосадочную жидкость в количестве 3 мл/л воды. Химический анализ массовой концентрации нефтепродуктов в воде и донных отложениях проводился в аккредитованных лабораториях методом ИК-спектрометрии на приборе «SPECORD M 80» («Carl Zeiss Jena», Германия); методика анализа – РД 39-0147098-015-90, ПНД Ф 14.1:2.5-95. Математико-статистическую обработку данных (сравнения и анализы)



проводили с использованием алгоритмов дисперсионного анализа, парного критерия Вилкоксона, критерия Манна-Уитни (Вилкоксона), рангового коэффициента корреляции Спирмена. Статистическая обработка данных и построение графиков выполнены в программе *Microsoft Office Excel 2003* («Microsoft Corporation»).

**Выживаемость и плодовитость *Limnodrilus hoffmeisteri* в условиях нефтяного загрязнения. Серия экспериментов № 1.** В эксперименте использовались 20 стеклянных аквариумов объемом 4,5 л (15×15×20 см). Длительность эксперимента – 30 суток от начала культивирования червей. Ил (400 г) равномерно распределяется по дну аквариума, загрязнялся нефтью (0,836; 3,344; 6,688; 10,032; 16,72 г/кг) и перемешивался лопаткой в течение 5 минут. Загрязненный ил находился в аквариумах в течение 7 суток; проводилось ежедневное перемешивание ила в течение 5 минут. Через 7 суток заливалось 3 литра водопроводной отстоянной воды без размыва ила. В каждый аквариум вносили минеральные удобрения – аммиачную селитру (18 мг) и суперфосфат (16 мг) (согласно норм, предусмотренных для рыбохозяйственных водоемов). С момента заполнения аквариума водой проводилась аэрация аквариумов (15–17 часов в сутки); распылитель воздуха располагался в 5–7 см от поверхности воды. Средняя температура в аквариумах во время эксперимента (30 суток) составила  $23,8 \pm 0,2^\circ \text{C}$ ; содержание кислорода 7–8 мг/л. Через 3 суток после заполнения аквариумов водой в одни из них помещали 1,5 г разновозрастных особей *Limnodrilus hoffmeisteri*, другие оставляли без червей. Во время эксперимента, 1 раз в неделю в аквариумы доливали водопроводную воду до первоначального уровня. По окончании эксперимента, грунт с червями извлекали и выбирали червей. Кормление червей проводили за весь период эксперимента 2 раза – в начале эксперимента, и через две недели.

**Перемещение *Limnodrilus hoffmeisteri* в нефтезагрязненных донных отложениях. Серия экспериментов № 2.** Использовались 18 стеклянных аквариумов, объемом 4,5 л. Длительность эксперимента – 60 суток от начала культивирования червей. Предварительно (за 10 дней до начала культивирования червей) проводилось загрязнение ила нефтью. Проводилось ежедневное перемешивание загрязненного грунта. Пробы на определение содержания нефти в илах отбирались на момент начала эксперимента (посадки червей в аквариумы). В эксперименте использовался: условно чистый ил (не загрязненный); ил с содержанием нефти 8,2 г/кг и 35,5 г/кг. Дно каждого аквариума условно разделяли на две равные половины – на дне аквариумов с внешней стороны маркером отмечали границу 2-х участков. Сначала в аквариумы помещали условно чистый (не загрязненный) ил – слева и загрязненный – справа. Внесение червей в ил проводили до наполнения аквариумов водой. Были выбраны три участка внесения червей (центр чистого участка; на границе участков, но на чистый грунт; центр загрязненного участка). В каждый аквариум вносили 30 взрослых особей *Limnodrilus hoffmeisteri* (1333 экз./м<sup>2</sup>). После внесения червей аквариумы заполняли 3-мя литрами воды. Аэрация проводилась 5–8 часов в сутки; температура воды в аквариумах во время эксперимента (60 суток) составляла 21–23° С. Кормление червей во время эксперимента не проводили. Ежедневно определялось количество червей на участках.



**Серия экспериментов № 3.** Для проведения экспериментов были изготовлены стеклянные аквариумы с размерами 20 × 10 × 1 см. Аквариум вертикально разделяли на 2 участка с помощью пластины. В левую часть аквариума загружали чистый (незагрязненный) ил. В правую часть аквариума с помощью шприца помещали загрязненный «свежей» нефтью ил. После загрузки ила заливалась вода. После заливки воды сразу проводилась посадка червей. 100 взрослых червей помещались в область чистого грунта вблизи границы чистого и загрязненного грунта. Эксперимент проводился при температуре воды 21–22 °С. Аэрация воды не проводилась. Кормление червей не проводилось. Длительность эксперимента составляла 7 суток со дня посадки червей. Ежедневно проводилась фиксация количества червей в левой и правой частях аквариума. Количество червей определяли визуально. Проведено 10 экспериментов с концентрациями нефти: 100, 50, 25, 15, 10, 7, 5, 3, 2 г/кг и без нефти.

**Роль тубифицид в потреблении кислорода донными отложениями, загрязненными нефтью Серия экспериментов № 4.** В 22 стеклянных аквариума, объемом 4,5 л помещали ил (400 г) и равномерно распределяли по дну аквариума. Эксперимент (в двойной повторности) поставлен с содержанием нефти (г/кг) – без нефти; 3,3; 6,7; 10,0; 16,7. Загрязненный ил находился в аквариумах в течение 7 суток и проводилось ежедневное перемешивание. Аквариумы наполняли водой (3 литра). Проводилась аэрация аквариумов (15–17 часов в сутки). Температура воды в аквариумах – 23,0° С; содержание кислорода 7–8 мг/л. Через 3 суток после заполнения аквариумов водой в одни из них помещали по 1,5 г взрослых особей *Limnodrilus hoffmeisteri*, другие емкости оставляли без червей. Измерения содержания растворенного кислорода в воде проводились на 10 сутки после внесения лимнодрилусов. Проведено 285 измерений концентрации растворенного кислорода в аквариумах в течение 12 часов. Измерения были начаты через 20 минут после отключения воздушных компрессоров-аэраторов.

**Серия экспериментов № 5.** Загрязненный нефтью ил в течение 30 суток ежедневно перемешивали. Исходное содержание нефти – 14,6 г/кг. В стеклянные аквариумы, объемом 4,5 л помещали ил (400 г). В каждый аквариум добавляли сертифицированные комплексные удобрения: аммиачную селитру (18 мг) и суперфосфат (16 мг). Количество удобрений рассчитано исходя из норм внесения удобрений для рыбохозяйственных водоемов. Далее в аквариумы вносили 2,0 г разновозрастных *Limnodrilus hoffmeisteri* и медленно наполняли водой в объеме 3 л. Доливка воды проводилась еженедельно. Температура воды 21–23° С. Аэрация круглосуточная. Замеры растворенного кислорода проводились через 10 минут после отключения компрессоров. Кормление червей в начале эксперимента, и далее раз в месяц. Длительность эксперимента 90 суток от посадки червей в аквариумы.

**Биотурбация нефтезагрязненного ила тубифицидами. Серия экспериментов № 6.** Ил, загрязненный нефтью в течение 30 дней перемешивали ежедневно. Через месяц загрязненный ил помещали в 5-ти литровые аквариумы слоем 5 см. После загрузки ила аквариумы наполняли водой. После заливки воды в каждую емкость помещали по 50 взрослых лимнодрилусов. Во время эксперимента (10 суток) аэрация воды не проводилась. Температура воды 21–22 °С. Эксперимент был поставлен с загрязненным нефтью илом в двух концентрациях по 5 аквариумов. Пробы ила отбирались ежедневно в течение 10 дней. Ил, не прошедший через



кишечник червей, отбирался стратометром из всей толщи ила (5 см) в 5-ти точках в каждом аквариуме. Фекалии лимнодрилусов отбирали стеклянной пипеткой возле порок лимнодрилусов. Отобранные пробы помещали в морозильную камеру до проведения анализа. Процессы биотурбации грунта исследовались путем измерения толщины слоя грунта (в мм) на «лицевой» стенке аквариума через каждые 5 мм.

**Влияние температуры воды и плотности *Limnodrilus hoffmeisteri* на процессы очистки донных отложений. Серия экспериментов № 7.** Ил помещали в 5-литровые емкости и добавляли различное количество нефти. Загрязненный ил находился в емкостях в течение 7 суток; проводилось ежедневное перемешивание. В эксперименте использован ил в концентрациях: 2,4; 5,5; 11,2 г/кг. Через 7 суток после загрязнения ил помещался в емкости объемом 200 мл по 35 г в каждую по две повторности. Емкости наполняли водой (по 150 мл). После заполнения емкостей водой, производили посадку взрослых лимнодрилусов: в контрольные емкости червей не помещали; в опытные емкости помещали лимнодрилусов, плотностью 2500, 5000 и 10000 экз./м<sup>2</sup>. Экспериментальные емкости были помещены в светонепроницаемые ящики. Эксперимент проводился в двух температурных режимах: при температуре воды 21–22° С и 5° С. Аэрация воды и кормление червей не проводилось. Ежедневно доливали воду до первоначального уровня. Длительность эксперимента составила 6 месяцев со дня посадки червей.

**Плодовитость *Limnodrilus hoffmeisteri* в нефтезагрязненных илах. Серия экспериментов № 8.** Использовали 0,5-литровые емкости; всего в эксперименте было задействовано 30 емкостей (5 контрольных – незагрязненных и 25 экспериментальных, с загрязненным илом). Длительность эксперимента – 60 суток от начала культивирования червей. Ил загрязняли нефтью и ежедневно перемешивали. Через 10 дней после загрязнения ила, в каждую емкость помещали по 30 г загрязненного ила. Пробы на определение содержания нефти в илах отбирались на момент начала эксперимента (посадки червей в аквариумы). В эксперименте были задействованы незагрязненный ил (контроль) и ил, загрязненный нефтью в концентрациях (г/кг): 0,15; 2,02; 4,40; 6,50; 12,23. После загрузки ила емкости заливались водой в объеме 300 мл. В каждую емкость помещали по 5 взрослых особей лимнодрилусов. Во время эксперимента (60 суток) аэрация воды и доливка воды не проводилась. Температура воды во время эксперимента составляла 22–23° С. Через 60 суток культивирования червей, ил разбирали под бинокуляром. Для каждой емкости фиксировалось: количество взрослых червей; количество молодежи; количество коконов; количество зародышей в коконе.

## **2.2 Природно-климатические условия районов экспериментальных работ по очистке водных объектов от нефти и нефтепродуктов**

*Озера Щучьи (загрязненные нефтью) и Безымянное (фоновое)* расположены в Усинском районе Республики Коми за Северным Полярным кругом и представляют собой систему термокарстовых слабопроточных озер. Озеро Щучье № 1, где проводились экспериментальные работы по очистке воды и донных отложений площадью 6,26 га. Максимально зафиксированная глубина 7 м.

*Выработанные обводненные карьеры песка Ханты-Мансийского автономного округа – Югры* (карьеры № 1 и № 2) расположены в Октябрьском районе ХМАО-Югры. Карьеры были сильно загрязнены нефтью, металлоломом и древесными остатками.



### **2.3 Материал и методы полевых гидроэкологических исследований**

Отбор и камеральную обработку проб гидробионтов проводили стандартными гидробиологическими методиками (Методика изучения биогеоценозов..., 1975) в 2004–2005 гг. Отбор проб гидробионтов в озере Щучье № 1 совпадает с пунктами отбора проб воды и донных отложений на гидрохимический анализ. Прозрачность воды определяли диском Секки. Температуру воды определяли с помощью ртутного термометра.

Помимо стандартных гидробиологических показателей (число видов, число экологических групп, численность и биомасса организмов) для оценки качества вод использовались биотические индексы: индекс сапробности Пантле и Букк (Дзюбан, Кузнецова, 1978); индекс видового разнообразия Шеннона (Одум, 1975; Макрушин, 1974); индекс удельного биотического разнообразия по формуле Шеннона (Рябов и др., 1980); олигохетный индекс Гуднайта и Уитлея (Макрушин, 1974). Степень видового сходства донных ценозов определяли по видовому составу олигохет по индексу Сёрнсена. Трофность донных ценозов определяли по шкале С.П. Китаева (1984). У рыб определяли: длина тела, масса с внутренностями, масса без внутренностей, пол, возраст, коэффициент упитанности по Фультону. За весь период наблюдений (2003–2005 гг.) было отобрано 54 объединенные пробы (по 4 дночерпателя) макрозообентоса – 42 пробы в оз. Щучье № 1 за период (2003–2005 гг.) и 12 в оз. Безымянное (2005 г.). Отобрано 18 проб фитопланктона и 17 проб зоопланктона. Для ихтиологических исследований озер Щучье и Безымянное в 2005–2006 гг. было отловлено 336 экземпляров рыб трех видов: щука (22 экз.), плотва (176 экз.) и окунь (138 экз.). Также использовались материалы по обследованию ихтиофауны озера Щучье к.б.н., М.Д. Гуманова. Отбор проб воды и донных отложений проводили представители Заказчика. Лабораторное определение нефтепродуктов в воде и донных отложениях проводилось в аккредитованных лабораториях методами ИК-спектрометрии.

### **Глава 3. ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ**

В главе (3 раздела; 9 подразделов) описаны используемые в мировой практике технологии очистки водных объектов от нефти и нефтепродуктов. Описаны технологии и средства локализации и сбора нефти с поверхности водных объектов. Рассмотрены сорбционные технологии, сжигание нефти, использование диспергаторов, технологии сбора нефти под ледовым покровом. Представлены комплексные технологии очистки водных объектов от нефти, технологии и устройства очистки толщ воды и донных отложений, включая собственные разработки автора. Описаны биологические технологии, биопрепараты и биосорбенты. Приведены материалы по фиторемедиации водных объектов. Кратко описаны технологии обезвреживания нефтесодержащих донных осадков и вод.

Несмотря на наличие большого количества технологий очистки водных сред от нефти и нефтепродуктов, комплексная очистка водных объектов не является до конца решенной задачей. Проблемным вопросом остается очистка донных отложений и придонных слоев воды от нефти. Наиболее перспективны технологии, включающие комплексный подход к ремедиации нефтезагрязненных водоемов и водотоков.



#### **Глава 4. ГИДРОБИОНТЫ В УСЛОВИЯХ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

В четвертой главе (в трех разделах) приведены результаты литературного анализа и собственных исследований автора по изучению влияния нефти на водные сообщества и организмы, рассмотрены аспекты биоиндикации и биотестирования нефтяных загрязнений, биоаккумуляции нефти и нефтепродуктов гидробионтами. Водные организмы подвержены влиянию нефти и нефтепродуктов, которое выражается в токсичном действии на организмы, и как следствие, изменении количественных и качественных характеристик сообществ, структуре, причем это влияние зависит от качественного состава нефти или нефтепродуктов, их концентрации и периодичности загрязнения. Важная роль отводится донным организмам в процессах самоочищения водных объектов от нефти.

#### **Глава 5. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ *LIMNODRILUS HOFFMEISTERI* (OLIGOSCHAETA, TUBIFICIDAE) В БИОРЕМЕДИАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ**

Олигохеты (*Oligochaeta*) – обитатели дна пресноводных водоемов. Обитают на поверхности или внутри донных отложений. Источником питания олигохет является содержащийся в отложениях детрит. Установлено (Alsterberg, 1922), что малощетинковые черви за сутки пропускают через кишечник грунт, превосходящий по весу в 4–6 раз вес их тела. При прохождении сквозь кишечник червя, органическое вещество проходит механическую обработку в мускулистых частях кишечника, и химическую – секретом желез, ускоряя процессы распада органического вещества. Данный тип питания способствует процессам самоочищения донных отложений.

##### **5.1 Анатомо-морфо-экологическая характеристика водных олигохет**

В разделе приведена анатомическая, морфологическая и экологическая характеристика водных малощетинковых червей и семейства *TUBIFICIDAE* *Vejdovsky, 1884* (тубифициды или трубочники).

##### **5.2 Роль олигохет в водных экосистемах Западной Сибири**

В разделе описано распространение олигохет в водоемах Западной Сибири, биотопическая приуроченность и распределение в разнотипных водоемах. Особое внимание уделено фауне олигохет Обь-Иртышского бассейна. Распределение олигохет по акватории Обского бассейна неравномерно. С продвижением с юга на север у олигохет обнаруживается замещение одних видов другими. Такая смена одного экологического комплекса другим обусловлена различными условиями среды. Наибольший видовой спектр олигохет сосредоточен в водных объектах среднеобского бассейна. Наличие благоприятных экологических условий и большого разнообразия биотопов благоприятствуют развитию комплекса червей. Количественное развитие олигохет в значительной степени определяется характером грунта и гидродинамическими условиями водных масс.

##### **5.3 Тубифициды в условиях нефтяного загрязнения**

Тубифициды, в том числе *Limnodrilus hoffmeisteri*, одни из самых широко распространенных организмов макрозообентоса. При увеличении антропогенного воздействия на водные экосистемы наблюдается упрощение экологической структуры донных сообществ – экологический регресс. Увеличиваются



количественные показатели бентоса за счет эврибионтных видов, среди которых массово развиваются олигохеты, в том числе и *Limnodrilus hoffmeisteri* (Попченко, 1999б). Известно, что малощетинковые черви весьма устойчивы к органическому загрязнению и химическим веществам. Потребляя в пищу грунт, весьма активно концентрируют в теле химические элементы, находящиеся в донных отложениях (Тимм, 1987; Попченко, Попченко, 1999). Так, при концентрациях нефти 0,5–5,0 г/кг наблюдается обеднение сообщества, перестройка доминирующего комплекса и наблюдается массовое развитие олигохет рода *Limnodrilus* (Михайлова, Исаченко-Боме, 2012). По материалам тюменских ученых (Михайлова и др., 2011), олигохеты являются наиболее устойчивые к нефтяному загрязнению после макрофитов. На илистых грунтах трех участков реки Васюган были прослежены отличия по олигохетному индексу «Гуднайта-Уитли» (Воробьев, 2003). Доля тубифицид в бентосе возрастала за счет большей выносливости этой группы к нефтяному загрязнению, что подтверждают и более ранние исследования других авторов (Петрова, 1981; Кравцова и др., 1988; Михайлова и др., 1998 и др.). По результатам очистных работ на озере Щучье № 1 (Усинский район, Республика Коми), первыми организмами, которые стали заселять донные ценозы озера, были олигохеты, достигая в первый год развития до 100 % по численности и биомассе (Лушников, Воробьев, 2006).

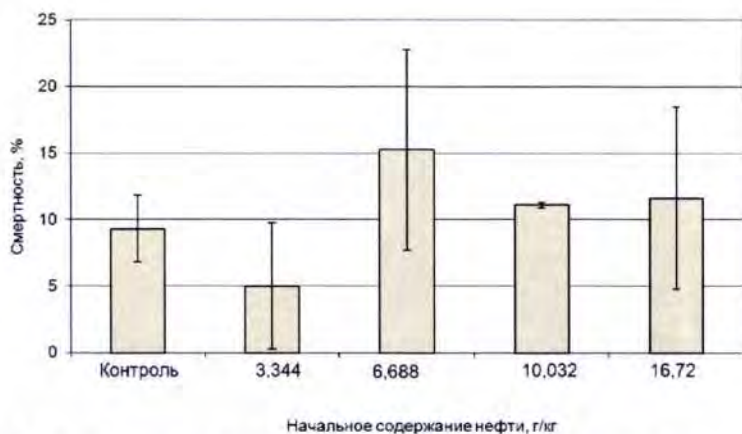
Тубифициды, являются типичными представителями донной фауны, которые способны выдерживать сильные загрязнения донных отложений и при этом активно участвовать в процессах самоочищения (Воробьев, 2006; Лушников, Воробьев, 2006). Для исследования возможности разработки технологии очистки нефтезагрязненных отложений нами был проведен комплекс серий лабораторных экспериментов, по результатам которого разработана технология «Способ биологической очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов» (Воробьев и др., Патент РФ № 2357929).

**5.3.1 Выживаемость *Limnodrilus hoffmeisteri* в условиях нефтяного загрязнения. Серия экспериментов № 1.** Концентрация нефти в донных отложениях, при которой тубифициды «чувствовали» себя нормально, и имели высокие количественные показатели, по данным Л.И. Цветковой (1972) – 6 г/кг. Полученные нами результаты показали, что зависимости смертности лимнодрилусов от концентрации нефти (до 16 г/кг) не выявлено (рис. 1). Во всех аквариумах обнаружено большое количество молоди лимнодрилусов. Выявлено (рис. 2), что через месяц культивирования червей в нефтезагрязненном иле, в аквариумах с червями концентрация нефти была ниже по сравнению с контрольными аквариумами в 1,20–1,72 раз или на 16,67–41,90 % ( $p < 5\%$ ).

**5.3.2 Перемещение *Limnodrilus hoffmeisteri* в нефтезагрязненных донных отложениях.**

**Серия экспериментов № 2** была посвящена изучению перемещения *Limnodrilus hoffmeisteri* в нефтезагрязненных донных илах. После перемещений в толще грунта (1–3 часа от посадки), некоторые черви приступали к активному питанию. Через 2–3 суток в контрольных аквариумах распределение червей по дну аквариума было равномерным. Между численностью встреченных червей в участках аквариума (чистые и загрязненные), не зависимо от мест внесения червей, в контрольных аквариумах достоверных отличий не выявлено.



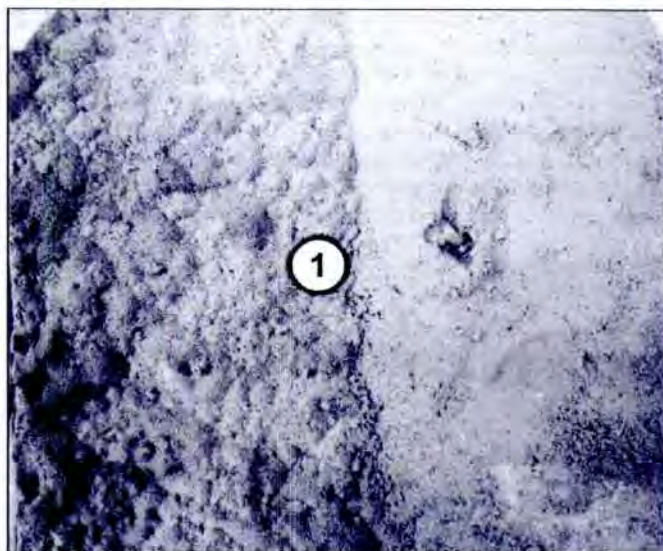


**Рис. 1.** Смертность червей (%) в экспериментальных аквариумах.



**Рис. 2.** Результаты химического анализа нефтезагрязненных грунтов.

На участках загрязненного грунта проходило передвижение червей. Черви передвигались по загрязненному нефтью участку ила, но длительная локализация червя и его питание наблюдалось единично. Чистые и загрязненные участки ила в аквариумах отличались визуально по результатам биотурбации (рис. 3).



**Рис. 3.** Жизнедеятельность червей в левой (чистой) части аквариума; содержание нефти в правой части – 35,5 г/кг; 1 – место начального внесения червей.

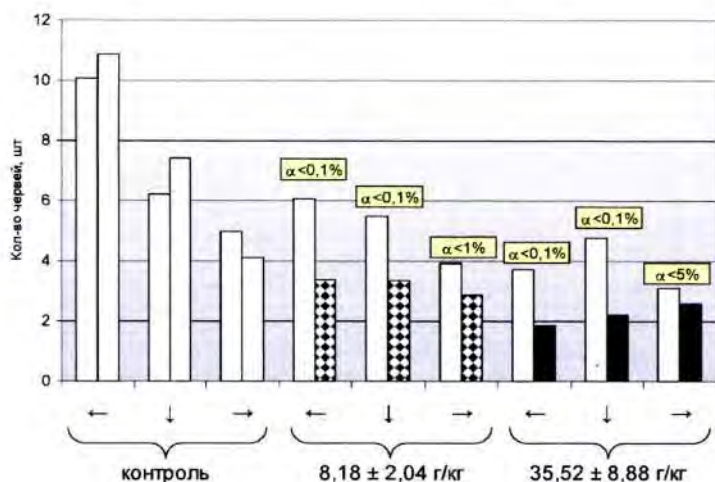
Статистические сравнения встреченных червей в разных участках аквариума показали, что чистые и загрязненные участки достоверно отличались по показателю встречаемости червей. В чистых участках, по сравнению с загрязненными, независимо от места начального внесения лимнодрилусов, количество визуально обнаруженных червей было достоверно выше (рис. 4).

Сравнение визуально обнаруженных червей в загрязненной зоне за два периода – за первый и второй месяц показало достоверные отличия между количеством встреченных червей за два периода (0–30 и 30–60 суток). В загрязненной части аквариума со временем процент встречаемости лимнодрилусов увеличивается.

**Серия экспериментов № 3** была проведена для определения нижнего порога чувствительности *Limnodrilus hoffmeisteri* к загрязнению илов «свежей» нефтью (Воробьев, 2011). Результаты эксперимента выявили (рис. 5), что при концентрации «свежей» нефти 2 г/кг черви свободно передвигаются и питаются как в чистой зоне, так и в загрязненной, распределяясь равномерно.

При концентрациях нефти в илах 6–7 г/кг наблюдалось снижение выживаемости червей-лимнодрилусов, а максимум выживаемости наблюдался при концентрации 3–4 г/кг нефти (Воробьев и др., 2008а). Так, в условиях культивирования червей двух экспериментов, были отличия по содержанию растворенного кислорода в воде (рис. 6). Расположение графиков в единой системе координат выявило единый «пик» выживаемости. В условиях дефицита кислорода (0,8–1,0 мг/л) максимальная выживаемость была на уровне 76 %, а в условиях с содержанием кислорода 7,0–9,0 мг/л она достигала 95 %.





**Рис. 4.** Среднее количество червей, визуально обнаруженных в левом (чистом) и правом (загрязненном) участке на протяжении всего эксперимента. Примечание. Место внесения червей: “←” – в левую часть аквариума (чистый); “↓” – в центральную часть аквариума (на границе участков, но на чистый грунт); “→” – в правую часть аквариума (загрязненный участок).



**Рис. 5.** Доли червей в частях аквариумов; указаны достоверные отличия по численности червей в левой (не загрязненной) и правой (загрязненной) частях.

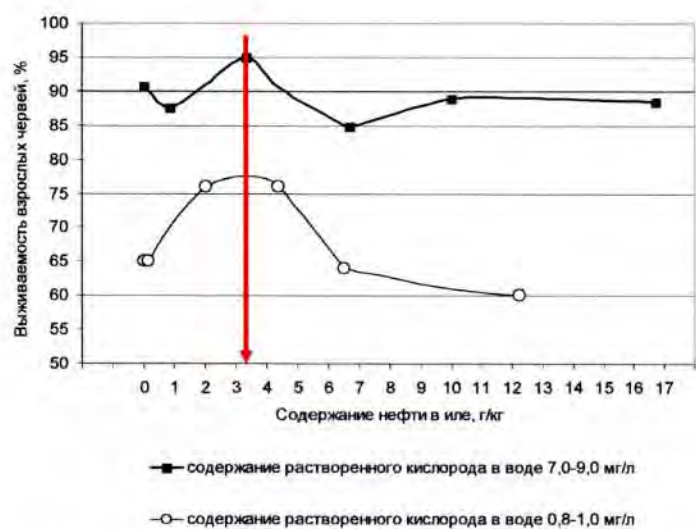


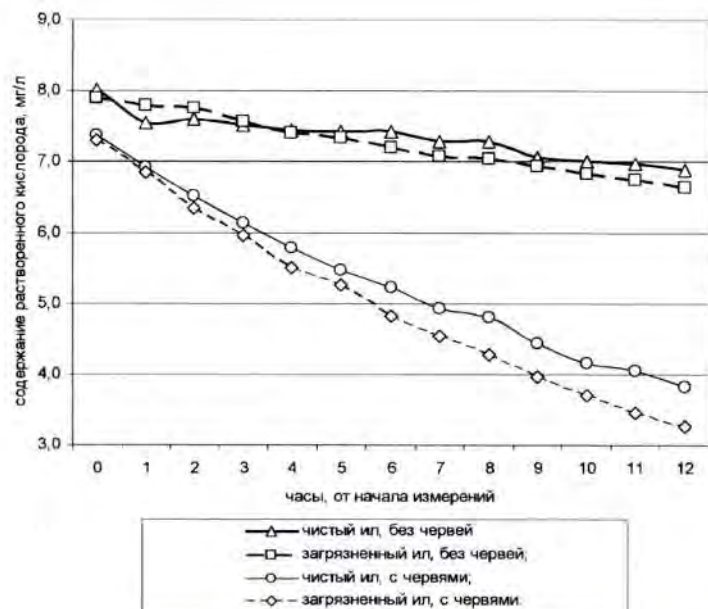
Рис. 6. Выживаемость лимнодрилусов в нефтезагрязненных отложениях (различное содержание растворенного кислорода в воде) (Воробьев и др., 2008a).

### 5.3.3 Роль тубифицид в потреблении кислорода донными отложениями, загрязненными нефтью

Поступление кислорода в донные отложения осуществляется вследствие процессов между толщей воды над грунтом и поровой водой. Донные отложения играют важную роль в кислородном режиме водных объектов, поскольку на границе раздела вода–донные отложения активно протекают биогеохимические процессы окислительного характера (Бреховских и др., 2006). Биологическое потребление кислорода илами связано в основном с деятельностью микрофлоры, основное количество которой находится в самом верхнем слое донных отложений. Важную роль в потреблении кислорода донными отложениями играет макрозообентос (Балушкина, 1984). Организмы создают сеть каналов (нор), и способствуют проникновению кислорода в толщу донных отложений, увеличивая скорость его диффузии на 2–3 порядка, что способствует развитию микрофлоры.

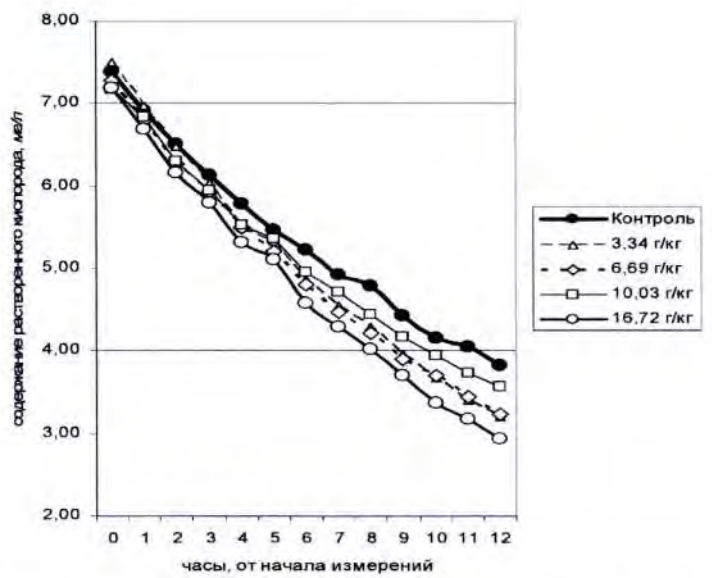
Для исследования роли червей-лимнодрилусов в потреблении кислорода в нефтезагрязненных донных отложениях была проведена *серия экспериментов № 4* (Воробьев и др., 2009). Целью являлось изучение особенностей потребления кислорода тубифицидами в нефтезагрязненных донных отложениях. Измерения содержания растворенного кислорода в воде показали, что во всех аквариумах этот показатель имел очевидную тенденцию к уменьшению (рис. 7). В аквариумах без червей, с чистыми и загрязненными донными отложениями, снижение кислорода было на одном уровне. Потребление кислорода в аквариумах с червями, достоверно отличалось ( $p < 0,1$  %) в чистых и загрязненных отложениях (рис. 7).



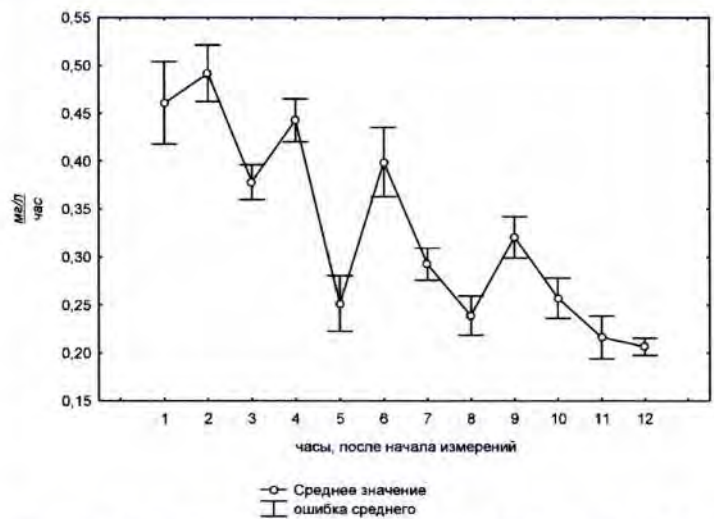


**Рис. 7.** Результаты измерений растворенного кислорода в воде (мг/л) аквариумов (Воробьев и др., 2009).

Снижение содержания растворенного кислорода в аквариумах с загрязненными отложениями достоверно отличалось ( $p < 0,1\%$ ) от контрольных (рис. 8). По мере снижения кислорода в аквариумах, наблюдалось и уменьшение его потребления (рис. 9). Между содержанием кислорода в аквариумах с червями и его потреблением была выявлена достоверная сильная положительная корреляционная связь:  $r = 0,90$  ( $p < 0,1\%$ ). Аналогичная закономерность отмечена и другими авторами (Побегайло, 1955; Архилова, 1980; Alsterberg, 1922). Внутри групп (аквариумы с червями и аквариумы без червей), влияние различных концентраций нефти в донных отложениях на потребление кислорода выявлено не было. Эксперименты показали, что в аквариумах с червями потребление кислорода превышало таковое в емкостях без червей в среднем в 4 раза ( $p < 0,1\%$ ). Интенсификация биохимического окисления илов обуславливается увеличением активной поверхности соприкосновения донных отложений с кислородом в результате деятельности червей. «Прокачивая» придонную воду через норы, увеличивается пористость донных отложений или «закачивая» в них воду для облегчения рытья нор, бентосные организмы способствуют усилению потребления кислорода донными отложениями (Мартынова, 1985).



**Рис. 8.** Содержание растворенного кислорода в аквариумах с червями; в легенде указано содержание нефти в донных отложениях (Воробьев и др., 2009).



**Рис. 9.** Динамика потребления растворенного кислорода в аквариумах с червями за время проведения 12-часовых измерений (Воробьев и др., 2009).



Поставленные дополнительно эксперименты показали, что при уменьшении содержания кислорода до 0,69–0,81 мг/л, червь менее чем на 25 % оставался погруженным в грунт. Оставшаяся часть тела совершала более активные колебательные движения; питания червей не наблюдалось. При концентрации кислорода ниже 5 мг/л отмечены более активные дыхательные движения, увеличивалась часть тела, участвующая в этих движениях, скорость питания замедлялась. Данные признаки ярко выражены по мере снижения кислорода.

**Серия экспериментов № 5.** Для изучения процессов интенсификации деструкции нефти в илах аэрацией были проведены серии экспериментов по изучению данного вопроса (Воробьев, 2011). Проведенные замеры растворенного кислорода в конце эксперимента (на 90-е сутки) отражали следующие результаты. В аквариумах, где проводилась аэрация, содержание кислорода было более 7 мг/дм<sup>3</sup>; максимум наблюдался в аквариумах без червей –  $7,31 \pm 0,05$  мг/дм<sup>3</sup>; в аквариумах с червями содержание кислорода было немного ниже и составило  $7,08 \pm 0,03$  мг/дм<sup>3</sup>. Аналогичные результаты насыщения воды растворенным кислородом фиксировались нами ранее (Воробьев, Залозный, 2009). Более низкие значения растворенного кислорода наблюдались в аквариумах, где аэрация не проводилась: в аквариумах без червей она составила  $4,75 \pm 0,10$  мг/дм<sup>3</sup>; в аквариумах с червями –  $3,06 \pm 0,02$  мг/дм<sup>3</sup>.

Результаты химических исследований илов по окончании эксперимента свидетельствовали о наличии различий по содержанию нефти в аквариумах с разными экспериментальными условиями (рис. 10). Наибольшая концентрация нефти по окончании эксперимента наблюдалась в аквариумах, где черви не культивировались, и не проводилась аэрация –  $14,2 \pm 0,2$  г/кг. В течение трех месяцев содержание нефти в илах снизилось всего на 2,6 %. Ранее, такие низкие темпы естественного самоочищения ила нами не фиксировались. Следует отметить и низкую очищающую способность в аквариумах без червей, где проводилась аэрация: средняя концентрация нефти на момент окончания эксперимента составила  $13,95 \pm 0,65$  г/кг, а снижение относительно исходного грунта – 4,3 %. Достаточно высокое содержание растворенного кислорода существенно не отразилось на комплексе очистных процессов в этих аквариумах. В аквариумах с лимнодрилусами, снижение нефти в донных отложениях было выражено более отчетливо и в условиях дефицита кислорода (без аэрации) составило на конец эксперимента  $12,9 \pm 0,3$  г/кг, а снижение относительно исходного грунта – 11,5 %.

Наиболее оптимальные условия для прохождения очистных процессов были созданы в аквариумах с червями, где проводилась круглосуточная аэрация воды. К концу эксперимента содержание нефти составляло  $10,05 \pm 0,05$  г/кг; снижение относительно исходного грунта составило 69 %. Наличие в воде достаточного количества растворенного кислорода и биотурбация, являются основными факторами, ускоряющими очистные процессы от нефти, проходящие в донных отложениях. При содержании растворенного кислорода на уровне 7 мг/дм<sup>3</sup>, черви в 7 раз увеличивали скорость снижения нефти в нефтесодержащих отложениях.

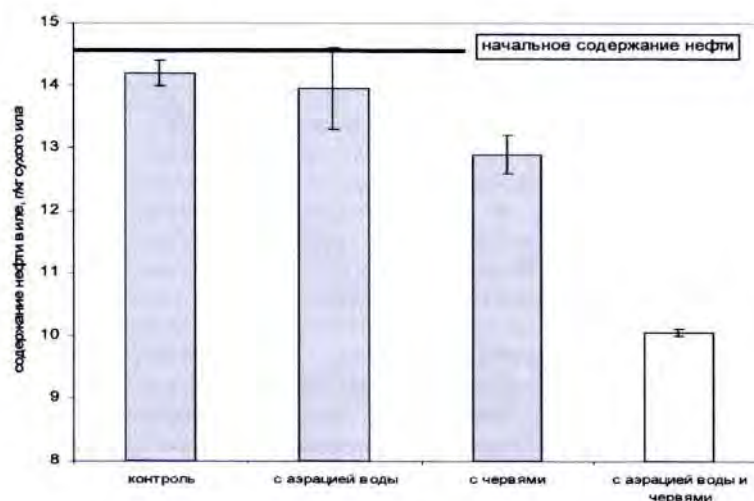


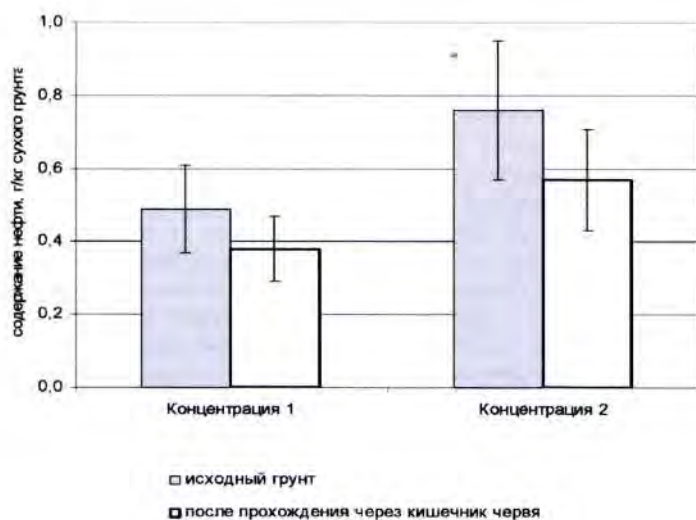
Рис. 10. Содержание нефти в конце эксперимента; I – ошибка среднего значения.

#### 5.3.4 Биотурбация нефтезагрязненного ила тубифицидами

Благодаря процессам биотурбации в донных отложениях, вызванных деятельностью живых организмов (норы, ходы, следы копания и ползания, а также переработка отложений в результате питания) происходят существенные изменения химического состава и свойств донных отложений (Scheu, 1987; Matisoff, 1995; Cunningham et al., 1999; Ciutat, Boudou, 2003). Суточный рацион лимнодрилусов превышает вес тела в 4–9 раз (Поддубная, 1961; Цветкова, 1969; Alsterberg, 1922). Ассимилируется очень малая доля съеденной пищи – у *Limnodrilus hoffmeisteri* – 5 % органического вещества (Цветкова, 1969; Brinkhurst, Austin, 1979). Перевариваются в основном бактерии (Brinkhurst, Chua, 1969). Проникая в глубь донных отложений, черви разрыхляют их. Поедая грунт из более глубоких слоев, черви выбрасывают его на поверхность дна, тем самым также разрыхляя их. Перемешивание донных отложений вследствие жизнедеятельности роющих организмов (биотурбация) обуславливает трансформацию различных соединений и их активное перемещение по профилю отложений, что также влияет на процессы обмена веществом между донными отложениями и водой (Мартынова, 1985).

**Серия экспериментов № 6.** Исследованы процессы биотрансформации нефтезагрязненного ила червями *Limnodrilus hoffmeisteri* (Воробьев, 2013). Ил, прошедший через кишечник червя, имел более низкое содержание нефти, чем исходный грунт (рис. 11). За счет ферментативных и бактериальных процессов, проходящих в кишечнике червя, установлено снижение концентрации нефти на 22,4–25,0 %. Аналогичные заключения сделаны другими авторами (Георга-Копулос, Алемов, 1990) при исследовании питания полихет донными осадками, загрязненными нефтяными смолами.





**Рис. 11.** Концентрация нефти в иле «до» и «после» прохождения через кишечник лимнодрилусов; отмечены области ошибки среднего значения.

Исследовано влияние жизнедеятельности червей в донных отложениях с различными концентрациями нефти на процессы биотурбации грунта. В качестве показателя использовали толщину слоя ила (Воробьев и др., 2010). Во всех аквариумах, где черви не культивировались, средняя толщина слоя ила составила  $12,1 \pm 0,1$  мм. В аквариумах с червями толщина слоя ила была достоверно выше  $19,8 \pm 0,2$  мм ( $p < 0,1\%$ ). Алгоритмом однофакторного дисперсионного анализа выявлено достоверное влияние концентрации нефти на процессы биотурбации ( $p < 0,1\%$ ) (рис. 12).

#### **5.3.5 Влияние температуры воды и плотности *Limnodrilus hoffmeisteri* на процессы очистки донных отложений от нефти**

Для исследования влияния плотности червей-лимнодрилусов на процессы деструкции нефти в илах в двух температурных режимах была проведена *серия экспериментов № 7* (Воробьев и др., 2012). Полученные результаты по содержанию нефти в экспериментальных емкостях через 6 месяцев посадки червей выявили тенденцию ускорения процессов очистки донных отложений от нефти по мере увеличения плотности лимнодрилусов. Во всех емкостях наблюдалось снижение содержания нефти по сравнению с исходным грунтом. Снижение содержания нефти в илах контрольных емкостей наблюдалось как при высоких температурах воды, так и при низких (табл. 1). При температуре  $21-22^\circ\text{C}$ , содержание нефти в контроле снизилось в 1,73 раз; при  $5^\circ\text{C}$  в 1,37 раз. По результатам эксперимента прослеживается зависимость очищения донных отложений от плотности червей (табл. 2).

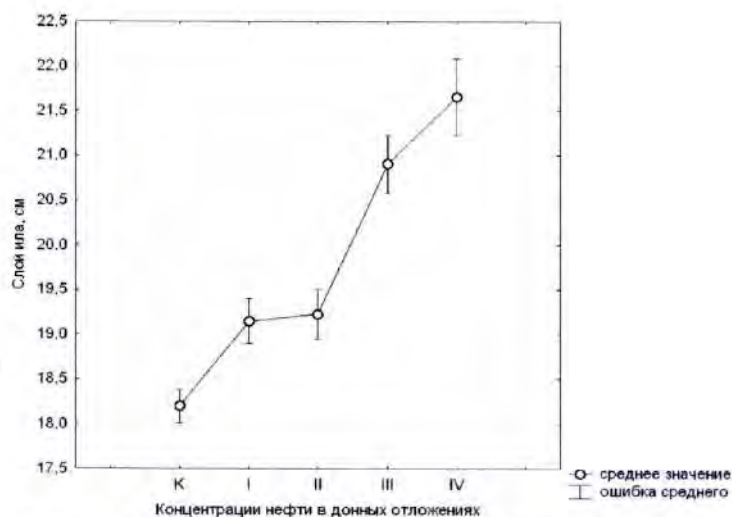


Рис. 12. Слой ила в аквариумах с червями и различными концентрациями нефти; К – контроль (без нефти); I – 3,3 г/кг, II – 6,7 г/кг, III – 10,0 г/кг, IV – 16,7 г/кг.

Таблица 1 – Отношение нефти «исходный грунт / контроль» через 6 месяцев

Температура воды, °С	Исходная концентрация №			$\bar{x} \pm m$
	1 (2,35 г/кг)	2 (5,45 г/кг)	3 (11,19 г/кг)	
21–22	1,8±0,5	1,7±0,4	1,7±0,4	1,73 ± 0,03
5	1,3±0,3	1,2±0,3	1,6±0,4	1,37 ± 0,12

Таблица 2 – Отношение концентраций нефти «контроль / опыт» («ил без червей / ил с червями») через 6 месяцев

Плотность червей, экз./м <sup>2</sup>	21...22 °С			$\bar{x} \pm m$	5 °С			$\bar{x} \pm m$
	Исходная концентрация №				Исходная концентрация №			
	1	2	3		1	2	3	
2 500	1,0±0,3	1,2±0,3	1,1±0,3	1,13 ± 0,07	1,4±0,3	1,2±0,3	1,1±0,3	1,24 ± 0,08
5 000	1,0±0,3	1,3±0,3	1,5±0,4	1,30 ± 0,14	1,4±0,4	1,2±0,3	1,4±0,3	1,35 ± 0,06
10 000	1,0±0,3	1,5±0,4	1,6±0,4	1,39 ± 0,18	1,4±0,3	1,6±0,4	1,4±0,4	1,47 ± 0,07
$\bar{A} \pm m$	1,0	1,33 ± 0,09	1,40 ± 0,15	1,24 ± 0,08	1,4	1,33 ± 0,13	1,30 ± 0,10	1,34 ± 0,05

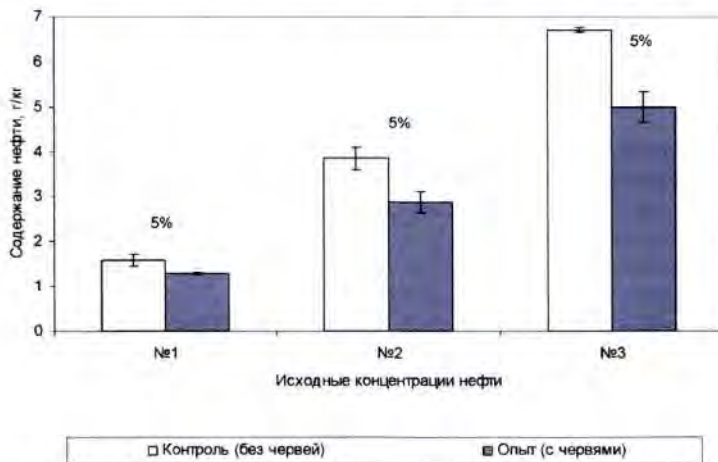
Примечание. Содержание нефти в исходных концентрациях см. в табл. 1.

Следует отметить, что при низких температурах воды (5 °С) процессы очищения, в среднем, проходили активнее (судя по отношению «контроль / опыт»), чем при температуре 21–22 °С: при плотности червей 2500 экз./м<sup>2</sup> на 10 %, при 5000 экз./м<sup>2</sup> на 4 %, при 10000 экз./м<sup>2</sup> на 6 %. Общеизвестно, что одними из основных факторов, влияющих на активность процессов деструкции нефти, являются температура среды и содержание кислорода. При увеличении температуры, активность углеводородокисляющих бактерий (УОБ) возрастает.



Как отмечают И.В. Перетрухина с соавторами (2006), изменения углеводородокисляющей активности бактерий носят выраженный сезонный характер и связаны с изменениями температуры воды. Минимальные значения активности наблюдаются, когда температура воды близка к минимальной, а максимальные значения углеводородокисляющей активности имеют место в летний период времени, при максимальных температурах воды. Кислородный режим влияет на активность УОБ аналогично: при увеличении концентрации растворенного кислорода, процессы деструкции проходят более активно. В проведенном эксперименте, наиболее оптимальный кислородный режим для прохождения процессов деструкции нефти наблюдался при температуре 5 °С. Так как аэрация экспериментальных емкостей не проводилась, и были исключены процессы фотоокисления нефти, то основным путем поступления кислорода в экспериментальные емкости следует считать инвазию кислорода из атмосферы. В условиях эксперимента содержание кислорода в емкостях с температурой воды 21–22° было менее 3 мг/л, что затормаживало процессы микробной деструкции нефти и снижало пищевую активность лимнодрилусов.

Сравнительный анализ содержания нефти в исходных илах и в конце эксперимента показал, что максимальное снижение нефти наблюдалось при максимальной концентрации нефти в илах (11,19 г/кг) при температуре 21–22° С: при численности лимнодрилусов 10000 экз./м<sup>2</sup> – в 2,8 раз и при численности лимнодрилусов 5000 экз./м<sup>2</sup> – в 2,6 раз. В условиях низких температур (5° С) эти показатели были немного ниже при той же концентрации нефти: при численности лимнодрилусов 10000 экз./м<sup>2</sup> – в 2,4 раза, 5000 экз./м<sup>2</sup> – в 2,3 раза. Объединив результаты, полученные в разных температурных условиях в единые совокупности, отмечены достоверные отличия ( $p < 5\%$ ) между содержаниями нефти в конце эксперимента в контрольных и опытных емкостях во всех концентрациях (рис. 13).



**Рис 13.** Содержание нефти в емкостях в конце эксперимента. Прим. Содержание нефти в исходных концентрациях см. в табл. 1.

### 5.3.6 Плодовитость *Limnodrilus hoffmeisteri* в нефтезагрязненных илах

Выживаемость, плодовитость, появление аномальных отклонений в эмбриональном развитии организмов – основные тест-функции, характеризующие отклик тест-объекта на повреждающее действие среды в существующих методиках биотестирования. Изменение любого показателя жизнедеятельности или функций организма под воздействием токсиканта зависит от его особенностей, специфики метаболизма организма, факторов внешней среды (Брагинский, 2000).

Серия экспериментов № 8 была проведена с целью исследования плодовитости червей в условиях нефтяного загрязнения. По результатам исследования, в условиях дефицита растворенного кислорода (0,8–1,0 мг/л) и температур воды 23° С, наибольшая выживаемость червей наблюдалась при содержании нефти 2–4 г/кг (рис. 14); достоверных отличий не выявлено.

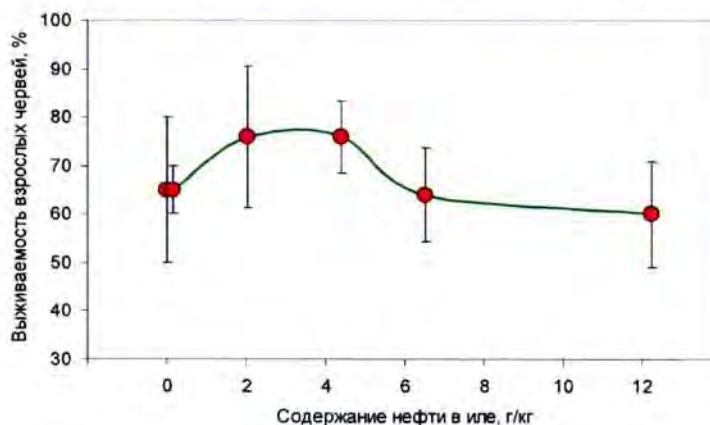


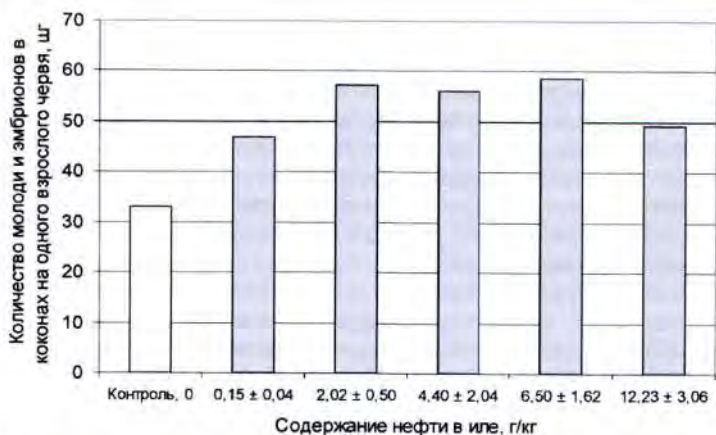
Рис. 14. Выживаемость лимнодрилусов в условиях дефицита кислорода (0,8–1,0 мг/л); отмечены области ошибки среднего значения.

Плодовитость – наследственно закрепленный признак, находящийся под сильным влиянием внешних воздействий. Плодовитость лимнодрилусов мы представили как сумму вышедших из коконов молодых червей и количества эмбрионов в коконах, отнесенных к количеству червей (рис. 15). Наибольшие показатели плодовитости червей в условиях дефицита кислорода наблюдались при содержании нефти в донных отложениях 2–7 г/кг.

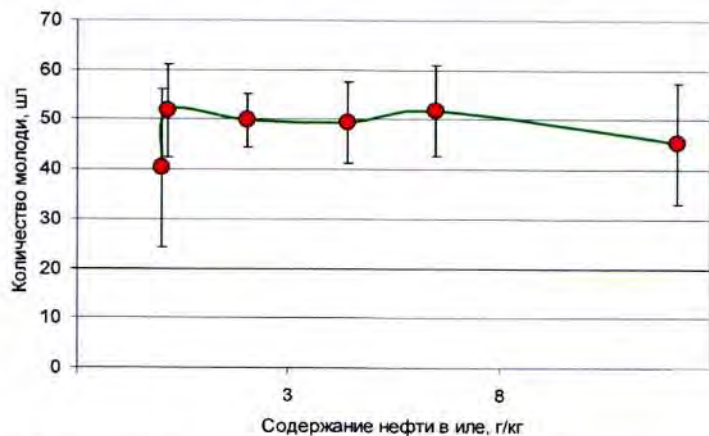
В контрольных аквариумах среднее количество вышедшей из коконов молодежи было минимальным по сравнению с экспериментальными аквариумами (рис. 16). Даже при минимальном содержании нефти в отложениях (0,15 г/кг) наблюдалось увеличение среднего количества червей в емкостях – 51,75 особей (или 10,35 особей молодых червей на одного взрослого). Достоверных отличий между количеством молодежи в аквариумах с разным содержанием нефти выявлено не было. При изучении влияния кислородного и температурного режимов на интенсивность обмена, развития и выживания тубифицид Н.Р. Архиповой (1980) было отмечено,



что молодь, только что вышедшая из коконов, отличалась лучшей выживаемостью и быстрым ростом при малых концентрациях растворенного кислорода в воде (1,76–1,82 мг/л при 18–20° С). По другим исследованиям (Богданов, 2008), средняя плодовитость тубифицид в течение 8 мес. содержания составила  $1,82 \pm 0,23$  кокона на особь за 14 суток. Выявлена неравномерность половой активности в течение 8 месяцев непрерывного культивирования, выраженная в повышении плодовитости в первые 3 месяца.



**Рис. 15.** Общее количество молоди и эмбрионов в коконах на одного взрослого червя (содержание кислорода 0,8–1,0 мг/л; через 60 суток после посадки червей).



**Рис. 16.** Среднее количество молоди лимнодрилусов в емкостях (содержание растворенного кислорода 0,8–1,0 мг/л; длительность эксперимента – 60 суток).

## **Глава 6. ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФЛОТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ**

В 2004–2006 гг. впервые в мировой практике была экспериментально испытана на заполярных водоемах республики Коми (система Щучьих озер в Усинском районе) флотационная технология очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов. По результатам работ и перспективам флотационной технологии нами опубликовано много работ (Лушников, Воробьев, Фадеев, 2004, 2005а, 2005б, 2005в, 2005г; Лушников, Фадеев, Воробьев 2005; Лушников, Воробьев, 2006; Лушников и др., 2006; Лушников, Воробьев и др., 2007б; Лушников, Терещенко и др., 2007). Также технология прошла успешные испытания на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры при очистке водоемов (обводненных карьеров) в 2006 г (Лушников и др., 2007а; Воробьев и др., 2008).

### **6.1. Технология производства работ по очистке воды и донных отложений**

Производство работ по комплексной очистке воды и донных отложений осуществлялось по технологии, защищенной Евразийским патентом № 009507. Очистка донных отложений от нефти действует на принципе флотации – способности молекулярного прилипания нефти к поверхности раздела двух фаз – воздуха и жидкости. Для сбора нефти с поверхности донных отложений использовался флотатор, обеспечивающий отделение нефти от донных отложений и подъем ее на поверхность воды. Производство работ по очистке водоема сопровождалось технологическими звеньями: расстановка на поверхности водоема «активных» бонов; аэрация воды; внесение минеральных удобрений; очистные сооружения для очистки воды (используется при необходимости сброса вод с искусственных водоемов в естественные водоемы и водотоки или на грунт).

### **6.2 Очистка от нефти озера Щучье № 1**

#### **6.2.1 Гидрометеорологические наблюдения**

Ежедневный гидрометеорологический мониторинг проводился в июле 2004 г. на участке производства работ. Глубина в точке мониторинга – 4,1 м. Средняя температура воздуха в июле месяце составляла:  $8^{00}$  – 16,5° С;  $14^{00}$  – 24,8° С;  $20^{00}$  – 22,8° С. В период летних наблюдений на оз. Щучье № 1 наблюдалась прямая температурная стратификация. Были выявлены термические зоны: эпилимнион, металимнион и гиполимнион. При изучении температурной стратификации на участке проведения очистных работ отмечено явление дихотермии. Факт дихотермии подтверждает эффективную работу аэраторов и флотаторов. *Средняя температура на поверхности воды* в июле месяце составляла:  $8^{00}$  – 21,6 ± 0,5° С;  $14^{00}$  – 23,2 ± 0,6° С;  $20^{00}$  – 23,8 ± 0,6° С. *Средняя температура в придонном слое воды* в июле месяце составляла:  $8^{00}$  – 13,4 ± 0,6° С;  $14^{00}$  – 14,0 ± 0,6° С;  $20^{00}$  – 13,3 ± 1,0° С.

#### **6.2.2 Гидробиологический мониторинг**

##### **6.2.2.1. Фитопланктон**

*Озеро Безымянное* – фоновый водоем, без признаков нефтяного загрязнения. Наибольшее развитие фитопланктона приурочено к зарослям макрофитов. Видовой состав за период обследования насчитывает 22 вида (табл. 3). Встречены виды,



характерные для слабопроточных вод. В оз. Щучье № 1 в 2004 г. удаление нефти, комплексное удобрение водоема, аэрация воды, способствовало незначительному развитию сине-зеленых водорослей. В 2005 г. фитопланктон развивался хорошо для таежных озер; всего отмечено 26 видов микроводорослей из 4 отделов (табл. 3). В июле на всей площади в поверхностном слое преобладали хлорококковые (*Dictyosphaerium pulchellum* Wood), в придонных слоях золотистые (*Dinobryon suecicum* Lemm). В августе, на основной площади озера, развитие фитопланктона снизилось количественно и качественно. Доминировал *Dictyosphaerium pulchellum* Wood из зеленых. Озеро Щучье № 2 было сильно загрязнено нефтью, что отражалось на видовом разнообразии фитопланктона – 11 видов (табл. 3).

#### 6.2.2.2 Зоопланктон

В оз. Безымянное обнаружено 15 видов зоопланктона, в оз. Щучье №1 – 11 видов, в оз. Щучье № 2 – 7 видов. В зоопланктоне озер обнаружены коловратки (*Kellicottia longispina*), а также ветвистоусые и веслоногие раки (из подотрядов циклопоида и каланоида). Обнаруженные виды представлены, главным образом, пелагическими фильтраторами (из рода *Daphnia*, *Bosmina obtusirostris*, *Eudiaptomus gracilis* и др.) и эвритопными формами (только *Chydorus sphaericus*), а также хищниками (*Heterocopa appendiculata*, *Macrocyclus albidus*, представители из рода *Cyclops*). Набор видов зоопланктона был типичный для слабопроточных северных водоемов. Доминировали веслоногие рачки (*Eudiaptomus gracilis*, *Heterocopa appendiculata*) и их молодь, в роли субдоминантов были ветвистоусые рачки босмина или дафния.

Летом 2005 г. в воде оз. Щучье № 1 обнаружено большее число видов зоопланктона, по сравнению с аналогичным периодом 2004 г., но видовое разнообразие следует охарактеризовать как не высокое.

Уровень количественного развития зоопланктона в оз. Безымянное значительно превышал оз. Щучье № 1 и № 2. Экологические индексы свидетельствуют о естественном состоянии и развитии зоопланктона в воде оз. Безымянное.

Состояние озер Щучье № 1 и № 2, оцененное по состоянию зоопланктона (общая численность и биомасса, доминирующие группы и виды, сапробность), находилось в пределах III класса (вода «умеренно загрязненная») (ГОСТ 17.1.3.07-82; Временные методические..., 1994). На участке контроля в оз. Безымянном вода оценивалась II–III классами качества воды (вода «чистая» – «умеренно загрязненная»).

#### 6.2.2.3 Макрозообентос

Озеро Щучье № 1. Впервые состояние донных ценозов озера Щучье № 1 нами было исследовано 15–17 сентября 2003 г. По результатам обследования на 8 станциях организмов макробентоса выявлено не было. Детритные и детритно-илистые отложения озера были покрыты слоем нефти до 2 см. В результате обследования макрозообентоса озера Щучье № 1 в 2005 г., после проведения очистных работ на озере, было обнаружено 8 групп донных животных (брюхоногие моллюски, двустворчатые моллюски, хирономиды, клещи, олигохеты, пиявки, стрекоты, поденки).

Таблица 3 – Видовой состав микроводорослей

Виды водорослей	Водоёмы		
	Озеро Безымянное	Щучье № 1	Щучье № 2
<b>Bacillariophyta</b>			
<i>Cyclotella kuetzingiana</i> Thw.	-	+	-
<i>C. comtensis</i> Grun.	+	-	-
<i>C. operculata</i> (Ag.) Kutz.	+	-	-
<i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grun.	-	+	+
<i>Tabellaria fenestrata</i> (Lungb.) Kutz.	+	+	-
<i>Ophephora Martii</i> Herib.	+	-	-
<i>Fragilaria crotonensis</i> Kitton	-	+	-
<i>Fr. Cupucina</i> Desm.	+	+	-
<i>Synedra ulna</i> (Nitzsch.) Ehrbg.	-	+	+
<i>S. acus</i> Kutz.	-	+	-
<i>S. acus</i> var. <i>radians</i> Kutz.	+	-	-
<i>S. tenera</i> W. Sm.	+	-	-
<i>S. tabulata</i> (Ag.) Kutz.	-	+	-
<i>S. amphicephala</i> Kutz.	+	-	-
<i>Eunotia faba</i> (Ehr.) Grun.	+	-	-
<i>E. gracilis</i> (Ehr.) Rabenh.	+	-	-
<i>Achnanthes biasoletiana</i> (Kutz.) Grun.	+	+	-
<i>Eucocconeis laponica</i> Hust.	-	+	-
<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun.	-	+	-
<i>Cymbella aequatilis</i> W. Sm.	+	+	-
<i>Nitzschia acuta</i> Hantzsch.	+	-	-
<i>N. obtusa</i>	+	-	-
<i>N. gracilis</i> Hantzsch.	-	+	-
<i>Gomphonema olivaceum</i> (Lingb.) Kutz.	+	-	+
<b>Chlorophyta</b>			
<i>Eudorina elegans</i> Ehr.	+	-	-
<i>Schroederia setigera</i> (Schroed.) Lemm.	-	+	-
<i>Francea ovalis</i> (France) Lemm.	-	-	+
<i>Ankistrodesmus bibracialis</i> (Reinch.) Korschik	+	-	-
<i>Ank. pseudomirabilis</i>	+	-	-
<i>Kirchneriella intermedia</i> Korschik.	-	+	-
<i>K. irregularis</i> (Smitt.) Korschik.	-	-	+
<i>Hyaloraphidium contortum</i> Rosch et Korschik	-	+	-
<i>Dicetyosphaerium pulchillum</i> Wood	+	+	+
<i>Scenedesmus acuminatus</i> (Lagerh.) Chodat	-	+	-
<i>Sc. acuminatus</i> var. <i>bernardii</i>	-	+	-
<i>Sc. bijugatus</i> (Turp.) Kutz.	-	+	-
<i>Sc. denticulatus</i>	-	-	+
<i>Sc. obliquus</i> (Turp.) Kutz.	+	-	-
<i>Fernandinella alpina</i> Chod et Kor.	-	+	-
<i>Cosmarium umbilicatum</i>	-	+	-
<b>Cyanophyta</b>			
<i>Stigonema mammosum</i> (Lyngb.) Ag.	-	-	+
<b>Chrysophyta</b>			
<i>Dinobryon divergens</i> Jmh.	-	-	+
<i>D. suecicum</i> Lemm.	-	+	+
<b>Euglenophyta</b>			
<i>Trachelomonas volvocina</i> Ehr.	-	+	+
<i>Tr. asymetrica</i> Roll.	+	-	-
<i>Tr. armata</i> var. <i>steinii</i>	-	+	-
<i>Strombomonas tambovica</i> (Swir.) Defl.	+	-	-
<i>Euglena tripteris</i> (Duj.) Klebs	-	+	-
<b>Итого</b>	<b>22</b>	<b>26</b>	<b>11</b>



Донные ценозы озера были представлены **детритно-илистыми** отложениями. Максимальные количественные показатели были отмечены у группы олигохет – 91,38 % по численности и 77,34 % по биомассе. Помимо олигохет были выявлены еще 2 группы – двустворчатые моллюски и хирономиды, которые играли заметно меньшую роль в исследуемых ценозах по количественным показателям (5,34 % по численности, 6,26 % по биомассе; 3,45 % и 15,23 % соответственно) (табл. 4). По результатам обследования в 2008 г., в бентосе обнаружены 3 группы – олигохеты (92,6 % по численности и 9,7 % по биомассе), двустворчатые моллюски – (3,7 % и 74,47 % соответственно) и брюхоногие моллюски (3,7 % и 15,9 % соответственно). Трофность детритно-илистых участков озера отнесена к очень низкому классу ( $\alpha$ -олиготрофному) в 2005 г. и к умеренному ( $\alpha$ -мезотрофному) в 2008 г.

**Таблица 4** – Показатели зообентоса детритно-илистых отложений оз. Щучье № 1.

Группа	Численность, экз./м <sup>2</sup>		Биомасса, г/м <sup>2</sup>	
	Среднее	min – max	Среднее	min – max
Олигохеты	530	0 – 4080	0,76	0 – 6,08
Хирономиды	30	0 – 240	0,06	0 – 0,48
Двустворчатые моллюски	20	0 – 160	0,15	0 – 1,2
<b>Всего, 2005 г.</b>	<b>580</b>	<b>0 – 4480</b>	<b>0,985</b>	<b>0 – 7,76</b>
<b>Межгодовая динамика макрозообентоса на детритно-илистых отложениях</b>				
2003 г.	0	Организмов нет	0	Организмов нет
2004 г.	0	Организмов нет	0	Организмов нет
2005 г.	580	0 – 4480	0,985	0 – 7,76
2008 г.	225	–	2,910	–

Исследование **участков прибрежной водной растительности** выявило 7 групп донных организмов (олигохеты, хирономиды, пиявки, поденки, клещи, брюхоногие моллюски и стрекозы). По показателю численности главную роль играла группа хирономид (64,76 %). Минимальные значения этого показателя имели 2 группы – поденки (0,24 %) и стрекозы (0,23 %). Самое высокое значение биомассы было отмечено для брюхоногих моллюсков (42,22 %). Хирономид составляли 22,44% от общей биомассы (табл. 5). Трофность ценозов по шкале Китаева определена как повышенная ( $\alpha$ -евтрофный).

**Таблица 5** – Количественные показатели макрозообентоса в прибрежной водной растительности (2005 г.).

Группа	Численность, экз./м <sup>2</sup>		Биомасса, г/м <sup>2</sup>	
	Среднее	min – max	Среднее	min – max
Олигохеты	1360	640 – 2440	0,95	0,44 – 1,88
Хирономиды	3626,70	2840 – 4520	2,45	2,08 – 2,80
Пиявки	160	0 – 240	2,28	2,6 – 4,24
Поденки	13,33	0 – 40	0,007	0 – 0,02
Клещи	26,67	0 – 80	0,08	0 – 0,24
Моллюски (брюхоногие)	373,33	280 – 840	4,61	2,6 – 11,24
Стрекозы	13	0 – 40	0,53	0 – 1,6
<b>Общий бентос</b>	<b>5600</b>	<b>3840 – 8120</b>	<b>10,92</b>	<b>3,00 – 17,81</b>

*Озеро Безымянное.* Обследовались 2 основных типа ценозов – детритно-илистые отложения и зона прибрежной водной растительности. В **детритно-илистых отложениях** было выявлено 4 группы (олигохеты, хирономиды, поденки, брюхоногие моллюски). Самой многочисленной группой в детритно-илистых отложениях озера Безымянное была группа хирономид (69,19 % от общей численности и 26,45 % от общей биомассы). Минимальные показатели отражали поденки (1,54 % от общей численности и 0,5 % от биомассы). Эта же группа обладала и самым маленьким показателем биомассы. Самым высокой биомассой обладала группа олигохет (37,19 %) (табл. 6). Трофность детритно-илистых биотопов оз. Безымянное следует отнести к очень низкому классу ( $\alpha$ -олиготрофному).

**Таблица 6** – Количественные показатели макрозообентоса детритно-илистых отложений озера Безымянное (2005 г.).

Группа	Численность, экз./м <sup>2</sup>		Биомасса, г/м <sup>2</sup>	
	Среднее	min – max	Среднее	min – max
Олигохеты	194	80 – 480	0,45	0,08 – 1,12
Хирономиды	514	80 – 2720	0,32	0,08 – 1,2
Поденки	11,43	0 – 80	0,006	0,04
Моллюски (брюхоногие)	23	0 – 160	0,29	2,04
<b>Общий бентос</b>	<b>742,86</b>	<b>160 – 2800</b>	<b>1,21</b>	<b>0,16 – 4,16</b>

В **зоне прибрежной водной растительности** оз. Безымянное было отмечено 9 групп макрозообентоса (олигохеты, хирономиды, двустворчатые моллюски, хелеиды, ручейники, пиявки, клещи, брюхоногие моллюски и веснянки). Самой многочисленной здесь была группа хирономид (72,4 % от общей численности и 37,76 % от общей биомассы). Наименьшую как численность так и биомассу имели 2 группы – ручейники и веснянки (0,36 % от общей численности и 0,13 % от общей биомассы) (табл. 7). Класс трофности определен как средний ( $\beta$ -мезотрофный).

**Таблица 7** – Количественные показатели макрозообентоса в зоне водной растительности озера Безымянное (заросли водной растительности; 2005 г.).

Группа	Численность, экз./м <sup>2</sup>		Биомасса, г/м <sup>2</sup>	
	Среднее	min – max	Среднее	min – max
Олигохеты	776	320 – 2160	2,90	0,32 – 6,16
Хирономиды	3232	1600 – 5040	2,36	0,88 – 5,84
Моллюски (двустворчатые)	64	0 – 160	0,144	0 – 0,32
Хелеиды	64	0 – 240	0,04	0 – 0,12
Ручейники	16	0 – 80	0,008	0 – 0,04
Пиявки	200	40 – 480	0,36	0,12 – 1,28
Клещи	32	0 – 80	0,02	0 – 0,08
Моллюски (брюхоногие)	48	0 – 80	0,416	0 – 1,28
Веснянки	16	0 – 80	0,008	0 – 0,04
<b>Общий бентос</b>	<b>4464</b>	<b>2320 – 6240</b>	<b>6,25</b>	<b>2,81 – 8,70</b>



Сравнение (2005 г.) количественных показателей (табл. 8) озер отразило, что бентофауна озера Щучье № 1 активно восстанавливалась, но была беднее представлена по количеству основных экологических групп (табл. 9). Степень видового сходства по индексу Сёрнсена по доминантной группе донных сообществ – олигохет составлял 82 %. Сравнительный анализ бентоса (табл. 10) позволяет отметить успешное применение технологической схемы очистки водного объекта. За сезон очистных работ, уже в 2005 г. были созданы условия для развития донной фауны озера.

**Таблица 8** – Средние количественные показатели макрозообентоса озер Щучье № 1 (контроль) и Безымянное (фоновое).

Водоем	Численность, экз./м <sup>2</sup>	Биомасса, г/м <sup>2</sup>
Оз. Щучье № 1 (2003 г.)	0	0
Оз. Щучье № 1 (2004 г.)	0	0
Оз. Щучье № 1 (2005 г.)	1949	3,30
Оз. Щучье № 1 (2008 г.)*	225	2,91
Оз. Безымянное (2005 г.)	2293	3,36

Примечание. \* – детритно-илистые отложения.

**Таблица 9** – Состав зообентоса озер Щучье № 1 (контроль) и Безымянное (фон)

Группа бентоса	Безымянное	Щучье
<b>Моллюски брюхоногие</b>	+	+
<b>Моллюски двусторчатые</b>	+	+
<b>Хирономиды</b>	+	+
<b>Клещи</b>	+	+
<b>Олигохеты</b>		
<i>Sylaria lacustris</i>	+	+
<i>Slavina appendiculata</i>	+	
<i>Nais barbata</i>	+	+
<i>Chaetogaster diaphanus</i>	+	+
<i>Lumbriculus udekemianus</i>	+	
<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	+	+
<i>Psammoryctides sp.</i>		+
<i>Tubifex tubifex</i>	+	+
<i>Spirosperma ferox</i>	+	+
<i>Lumbriculus variegatus</i>	+	+
<b>Пиявки</b>		
<i>Glossiphonia complanata</i>		+
<i>Helobdella stagnalis</i>		+
<i>Erpobdella octoculata</i>	+	+
<b>Стрекозы</b>		
Caenagrionidae		+
Cordullidae	+	
<b>Поденки</b>		
EphemereIIDae		+
Caenidae	+	
<b>Хеленды</b>	+	
<b>Веснянки</b>	+	
<b>Ручейники</b>		
Polycentropodidae	+	
Limnephilidae	+	
<b>ИТОГО</b>	<b>20</b>	<b>17</b>

Таблица 10 – Показатели гидробиологических индексов (зообентос)

Озеро	Количество гидробиологических групп (таксонов)	Шеннон	Гуднайт и Унтлей
<b>Заросли водной растительности</b>			
Безымянное (фон), 2005 г.	13	1,78 (IV *)	17,2 (I)
Щучье № 1, 2005 г.	17	2,03 (III–IV)	23,1 (II)
<b>Детритно-илистые отложения</b>			
Безымянное (фон), 2005 г.	7	1,37 (IV)	49,6 (I)
Щучье № 1, 2003 г.	0	0 (VI)	0 (VI)
Щучье № 1, 2004 г.	0	0 (VI)	0 (VI)
Щучье № 1, 2005 г.	4	0,81 (V)	95,5 (VI)
Щучье № 1, 2008 г.**	3	0,46 (VI)	92,6 (VI)

Примечание. \* – классы качества ДО: I – очень чистые; II – чистые; III – умеренно загрязненные; IV – загрязненные; V – грязные; VI – очень грязные.

#### 6.2.2.4 Ихтиофауна

В практике мониторинга водных экосистем в качестве объектов-индикаторов достаточно широко используют рыб. Эти объекты удобны для вылова и отбора проб органов и тканей, обладают крупными размерами, имеют сравнительно большую численность, накапливают токсиканты, имеют продолжительный жизненный цикл. В настоящее время для оценки состояния водных экосистем используется ряд ихтиоиндикационных методов, объединяемых под названиями: популяционно-видовой, по составу паразитов, этологический, физиологический, гистологический, биохимический, иммунологический, токсикологический и другие (Попов, 2002).

Ихтиофауна исследованных озер по результатам сетевых уловов 2005–2006 гг. была представлена тремя широко распространенными видами: окунь, щука, плотва. Доминантным видом, как в оз. Щучье № 1, так и в оз. Безымянное являлся окунь (69,2 % и 51,9 % соответственно). Субдоминант – плотва (29,1 % и 44,5 % соответственно). Минимальными показателями численности обладала щука, составив в сетевых уловах в оз. Щучье – 1,8 %, в оз. Безымянное – 3,6 %.

**Щука – *Esox lucius* Linnaeus.** На основе обработанного материала можно отметить, что длина тела щуки в уловах озера Щучье № 1 колеблется от 286 до 385 мм, в среднем составляя 337,5 мм. Масса щуки в уловах озера Щучье № 1 колеблется от 184 до 478 г, в среднем составляя 299 г. В сетевых уловах озера Безымянного длина тела щуки составляла 245–336 мм (в среднем 286,5 мм). Доминирующей группой (37,5 %) являются особи с длиной тела 245–268 мм.

Масса щуки в уловах оз. Безымянное находилась в пределах 133–309 г, в среднем составляя 202 г. Доминирующей (56,2 %) является группа особей с массой тела 133–177 г. Наибольшее количество самцов (37,5%) и самок (18,7%) находится в этом же весовом интервале. В уловах оз. Безымянное щука представлена тремя возрастными группами от 4+ до 6+ лет. Доминирует среди самцов и самок возрастная группа 4+ лет, составляя 31,2 % и 18,7 % соответственно. Коэффициент упитанности щуки в уловах оз. Щучье № 1 в среднем составлял  $0,75 \pm 0,03$ , а в оз. Безымянное –  $0,84 \pm 0,01$ .



В результате исследований ихтиофауны оз. Щучье (Туманов и др., 2013) в период с 2001 по 2005 гг. был отмечен факт 100 % уровня встречаемости морфологических отклонений в строении костей черепа у щуки. У всех экземпляров верхняя челюсть была укорочена и отогнута кверху, нижняя – либо также была изогнута и укорочена, либо выступала за край верхней выше нормы. В результате произведенного в 2008 г. осмотра 31 экз. щуки, описанные выше нарушения костей черепа были выявлены только у одной (рис. 17). За период с 2005 г. по 2008 г. частота встречаемости щук с уродствами снизилась со 100 % до 3 %. Выявленный факт указывает, что в исследованных водоемах за последние 4 года произошло существенное улучшение качества среды обитания гидробионтов.

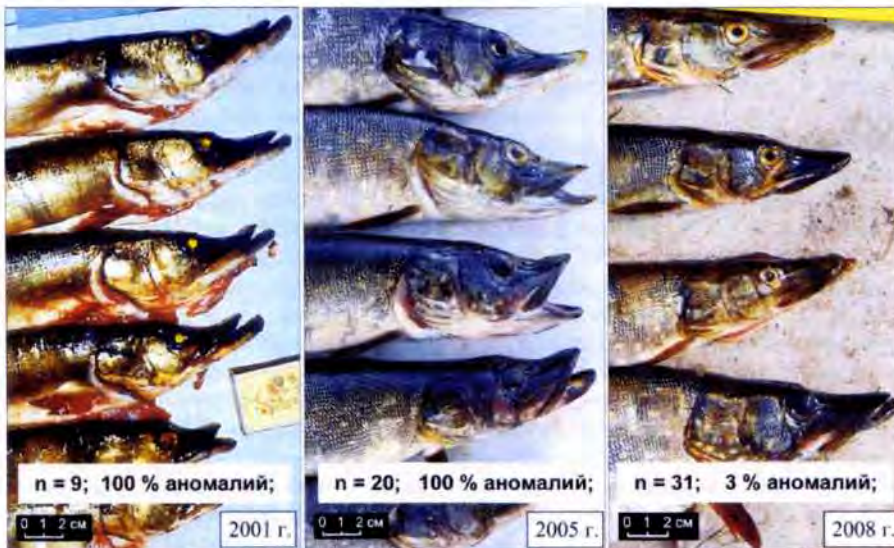


Рис. 17. Аномалии в развитии челюстного аппарата щуки (Туманов и др., 2013)

**Окунь – *Perca fluviatilis* Linneus.** В сборах из оз. Щучье № 1 окунь представлен пятью возрастными группами от 6+ до 11+ лет. Возрастная группа 8+ лет, составляющая 50 % от всего улова окуня, преобладает по численности. Наиболее полно представлены две возрастные группы: 7+ и 8+ лет. Во всех возрастных группах самки по численности преобладают над самцами (76,3 %). Длина тела окуня в уловах оз. Щучье № 1 колебалась от 129 до 201 мм. В доминирующей по численности группе 8+ лет встречались особи с длиной тела 126–172 мм, в среднем составляя  $148,5 \pm 1,75$  мм. Масса окуня составляла 39–146 г, наибольшее количество особей находилось в интервале 54–64 г. В наибольшей по численности группе 8+ лет особи имеют массу в пределах от 35 до 103 г. Коэффициент упитанности окуня по Фультону в уловах оз. Щучье № 1 в среднем составлял  $1,85 \pm 0,01$ . Тенденции к увеличению коэффициента упитанности с возрастом не прослеживалось.



В уловах оз. Безымянное окунь представлен шестью возрастными группами от 6+ до 11+ лет. Наибольшее число особей находится в возрастной группе 7+ лет, составляющие 45,1% от общего улова. Возрастная группа 8+ лет так же представлена довольно большим числом особей (35,5 %). Единично представлены самки в возрасте 10+ и 11+ лет. Самки, так же как и в оз. Щучье № 1, во всех возрастных группах преобладают над самцами. Длина тела окуня оз. Безымянное находилась в пределах 109–169 мм, больше всего особей (21,6 %) в уловах, имеющие длину тела 125–133 мм. Самая многочисленная возрастная группа 7+ лет включает в себя особей с длиной тела 122–160 мм, в среднем –  $137,5 \pm 2,12$ . Масса окуня в уловах оз. Безымянное колебалась в пределах от 18 до 94 г, наибольшее число особей (21,6 %) с массой 28–38 г. В самой многочисленной возрастной группе особей 7+ лет масса окуня колеблется от 31 до 73 г, в среднем составляя  $48,8 \pm 2,57$  г. Коэффициент упитанности окуня в сборах оз. Безымянное составлял 1,32–2,19. В возрастной группе 7+ лет этот признак находится в интервале 1,60–2,19, составляя в среднем  $1,83 \pm 0,03$ . С увеличением возраста коэффициент упитанности имел тенденцию к увеличению. Достоверные различия по измеряемым показателям между окунем оз. Щучье № 1 и оз. Безымянное не выявлены.

Проведен (Воробьев и др. 2008) сравнительный анализ линейного роста окуня из оз. Щучье № 1 с 76 озерами Европы, Средней Азии, Сибири, Северной Америки (Попова, 1971; Судаков, 1977; Скрябин, 1977; Рыбы Телецкого озера, 1981). Линейные показатели окуня во всех водоемах превышали таковые оз. Щучье № 1 (2003 г.). В условиях нефтяного загрязнения водоема темп роста окуня был минимален – особи, отловленные в 2003 г. достоверно имели более низкие показатели темпа роста, чем в 2006 г. (после двухлетнего цикла очистных работ) начиная с 3-х летнего возраста (рис. 18). Проведенные сравнения абсолютных размерно-весовых показателей окуня одновозрастных групп (5+, 6+, 7+ лет) из уловов 2003 и 2006 гг. выявили достоверные отличия между выборками (рис. 19). Основопологающим фактором увеличения линейно-весовых показателей явилось повышение численности и биомассы кормовых организмов в озере как результате реализации комплекса очистных мероприятий. Исследование роста окуня оз. Щучье дает основание утверждать об улучшении качества среды обитания гидробионтов. Двухлетние мероприятия по очистке озера от нефти дали положительные результаты практически сразу после окончания работ – появление организмов зообентоса на ранее безжизненных участках дна озера, развитие высшей водной растительности в прибрежье, где развивались фитофильные сообщества гидробионтов.

**Плотва – *Rutilus rutilus lacustris* (Pallas).** В оз. Щучье № 1 плотва представлена четырьмя возрастными группами от 4+ до 7+ лет. Среди самцов доминирует возрастная группа 5+ лет, составляя 6,2 % от общей выборки, среди самок преобладающей группой являются особи с возрастом 6+ лет (42,8 %). Возрастные группы 5+ и 6+ лет представлены наиболее полно (32,6 % и 46,9 % соответственно). Во всех возрастных группах самки преобладают над самцами, занимая 87,7 % от общего улова. Длина тела плотвы в уловах оз. Щучье № 1 составляет 124–169 мм, больше всего особей (20,4 %) в уловах, имеющие длину тела 147–152 мм. В преобладающей по численности возрастной группе 6+ лет длина тела плотвы



находилась в пределах 126–179 мм, составляя в среднем  $154 \pm 1,49$  мм. Масса плотвы в сборах оз. Щучье № 1 колеблется от 35 до 108 г, большинство особей имеют массу 57,0–87,5 г. В самой многочисленной возрастной группе 6+ лет масса тела плотвы колеблется 43–121 г, в среднем составляя  $78,02 \pm 2,27$ . Коэффициент упитанности плотвы оз. Щучье № 1 в среднем составлял 2,12.

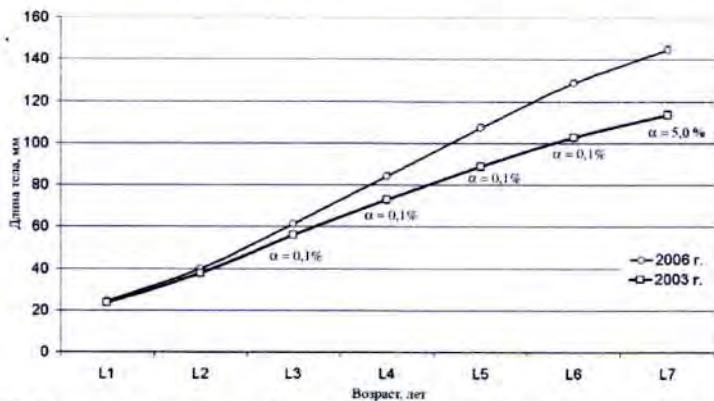


Рис. 18. Темп роста окуня в оз. Щучье № 1; приведены уровни значимости ( $\alpha$ ).

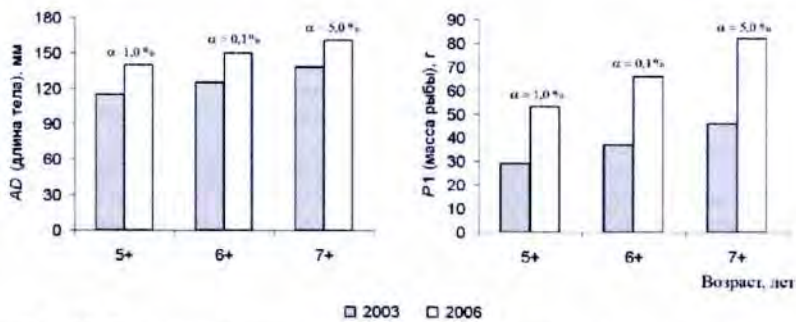


Рис. 19. Длина и масса окуня оз. Щучье № 1; приведены уровни значимости ( $\alpha$ ).

В уловах оз. Безымянное популяция плотвы представлена восемью возрастными группами от 5+ до 12+ лет. Наибольшее число особей находится в возрастной группе 8+ лет, составляющие 28,9 % от общего улова. Возрастная группа 7+ лет так же представлена довольно большим числом особей (27,6%). Единично представлены самцами возрастные группы 5+, 9+ и 12+ лет. Наиболее полно представлены четыре возрастные группы от 6+ до 9+ лет. Во всех возрастных группах самки по численности преобладают над самцами, занимая 77,3 % от общего улова. Три возрастные группы (8+ 10+ и 11+ лет) представлены только самками.

Длина тела плотвы в уловах оз. Безымянное варьирует от 113 до 176 мм. В интервалах 128,0–135,5 мм (20 %) и 143,0–150,0 мм (18,6 %) находилось наибольшее число особей. Средняя длина самок в самой многочисленной возрастной группе 8+ лет составляла  $150,64 \pm 1,49$  мм. Длина тела плотвы в возрасте 7+ лет колеблется в пределах от 128,4 до 138,5. Масса плотвы в уловах оз. Безымянное составляла 27–105 г. Наибольшее число особей (25,3 %) имело массу тела, находящуюся в интервале 63–72 г. Самая многочисленная группа 8+ лет, состоящая из одних самок имела массу тела 62–86 г, а группа особей с возрастом 7+ лет – 33–69 г. Коэффициент упитанности плотвы из оз. Безымянное в среднем составлял  $1,9 \pm 0,02$ .

Сравнивая линейные и весовые показатели плотвы озер, следует отметить их превышение в оз. Щучье № 1. Были получены достоверные отличия размерно-весовых показателей плотвы в возрасте 6+ лет озер Щучье № 1 и Безымянное.

### 6.2.3 Содержание нефтепродуктов в воде и донных отложениях

**Вода.** По результатам гидрохимических анализов проб поверхностной воды в 2004 г., во втекающем водотоке (точка № 1) в озеро Щучье № 1 средняя концентрация растворенных нефтепродуктов в воде составила  $2,52 \text{ мг/дм}^3$ . На экспериментальном участке озера (точки № 2, 3, 5) данный показатель был ниже в 6 раз и составил  $0,42 \text{ мг/дм}^3$  (табл. 11). Колебания содержания нефти в поверхностной воде связано с проведением очистки донных отложений («вторичное» загрязнение). Следует отметить, что во время проведения очистки ДО (июль-август) на экспериментальном участке наблюдалось снижение концентрации нефтепродуктов в воде. «Активные» боны, установленные на озере, эффективно справлялись с потоком нефтепродуктов, снижая их содержание в поверхностных водах.

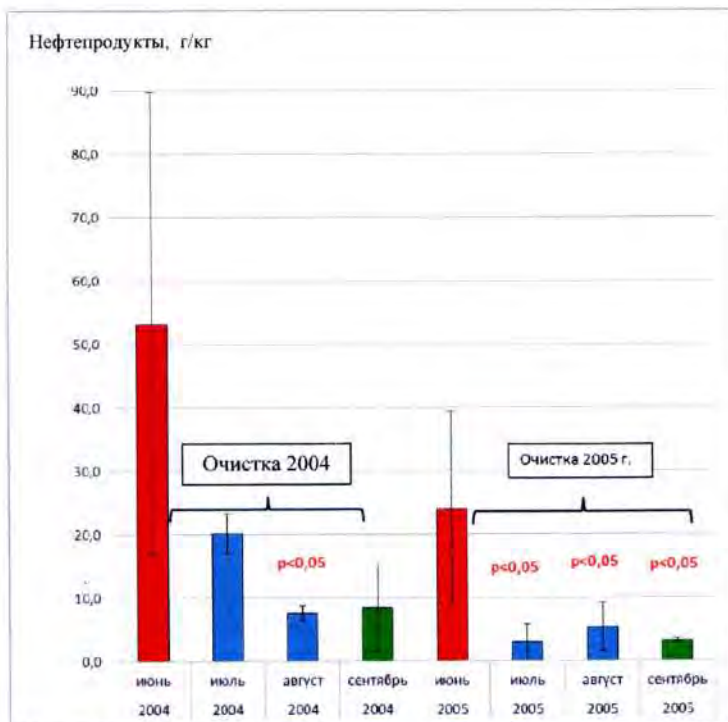
Таблица 11 – Содержание нефтепродуктов в поверхностной воде ( $\text{мг/дм}^3$ ) оз. Щучье № 1 (июнь–сентябрь 2004 г.)

Месяц	ТОЧКИ ОТБОРА ПРОБ					Среднее в месяц *
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	
Июнь	7,88	0,59	0,65	0,27	0,38	0,54
Июль	0,62	0,21	0,19	0,14	0,69	0,36
Август	0,30	0,35	0,48	0,13	0,29	0,37
Сентябрь	1,08	0,47	0,60	0,67	0,63	0,57
Октябрь	2,73	0,29	0,28	0,35	0,23	0,27
Среднее	2,52	0,38	0,44	0,31	0,44	0,42

Прим. \* – Среднее значение в зоне работ (точки 2, 3, 5); точка 1 – впадающий в озеро ручей.

**Донные отложения.** За два летних сезона работ 2004–2005 гг. из озера Щучье № 1 было извлечено  $282 \text{ м}^3$  нефти, из них  $173 \text{ м}^3$  извлечено из донных отложений. Среднее содержание нефти в донных отложениях было снижено более чем 16 раз (с  $53,3 \text{ г/кг}$  до  $3,3 \text{ г/кг}$ ). По результатам гидрохимических исследований донных отложений озера Щучье № 1 в 2004–2005 гг. была достоверно доказана эффективность очистных мероприятий способом очистки воды и донных отложений водоемов от нефти и нефтепродуктов (рис. 20). Увеличение содержания нефти в отложениях в июне 2005 года связано с ее поступлением в водный объект в результате аварийного разлива в водосборной территории впадающего в оз. Щучье № 1 ручья.





**Рис. 20.** Содержание нефтепродуктов в донных отложениях озера Щучье № 1 в период очистных работ 2004–2005 гг. (указаны ошибки среднего значения и уровни значимости отличий от первоначального содержания нефти (июнь 2004 г.)).

### 6.3 Очистка обводненных карьеров от нефти (ХМАО–Югра)

В 2006 г. ООО «НТО «Приборсервис» было очищено два модельных нефтезагрязненных карьера в ХМАО–Югре в рамках комплексного проекта рекультивации выработанных карьеров песка (Воробьев, Лушников и др., 2008). *Карьер № 1* представлял собой водоем, площадью 6,4 га и глубиной 6,2 м. *Карьер № 2* был по площади 1,7 га, глубиной 1,5 м; в прибрежной зоне и на дне карьера находился металлолом; вода была полностью покрыта нефтью. Результаты очистных работ на карьере № 1 показали высокую степень очистки донных отложений – содержание нефти снизилось в 580 раз (табл. 12). Высокая эффективность мероприятий была обусловлена нахождением нефти на поверхности ила. С поверхности воды и донных отложений карьера № 1 за весь период работ было убрано 64 м<sup>3</sup> нефти. Содержание нефти в донных отложениях карьера № 2 было снижено в 7 раз (табл. 12). Низкая эффективность очистки была обусловлена сильным механическим воздействием на загрязненный грунт (перемешиванием) в процессе очистки дна карьера от металлолома. В результате очистных работ 2006 г. на карьере № 2 было убрано 464 м<sup>3</sup> нефти (более 430 м<sup>3</sup> с поверхности воды).

**Таблица 12 – Содержание нефти в составе донных отложений (мг/кг) до (июнь 2006 г.) и после (сентябрь 2006 г.) проведения очистных работ, мг/кг**

Показатель	Обводненные выработанные песчаные карьеры			
	№ 1		№ 2	
	ДО	ПОСЛЕ	ДО	ПОСЛЕ
Среднее значение	40 764,8	70,2	76 417,7	10 892,8
Стандартная ошибка	24244,6	17,9	22158,1	3128,5
Минимум-максимум	2049,5–157762,6	> 50,0–159,4	36270,3–137562,1	4957,0–18942,0
Уровень значимости отличий	P < 1 %		P < 5 %	

### ВЫВОДЫ

1. Содержание нефти в донных отложениях в концентрациях 16,72 г/кг не вызывает гибель лимнодрилусов, отмечено появление молоди. В результате жизнедеятельности тубифицид (на примере *Limnodrilus hoffmeisteri*), концентрация нефти в донных отложениях снижается за 30 суток в 1,20–1,72 раз или на 16,67–41,90 %, что возможно использовать в мероприятиях по биологической очистке донных отложений водоемов от нефти.

2. Достоверно установлено, что лимнодрилусы перемещаясь в загрязненных «свежей» нефтью грунтах предпочитают чистые (незагрязненные) участки ила. Границей толерантности лимнодрилусов к «свежей» нефти следует считать 2 г/кг. Ил, загрязненный «свежей» нефтью обладает максимальной токсичностью.

3. При проведении аэрации воды и посадке червей-лимнодрилусов наблюдается максимальный эффект очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов – при концентрации растворенного в воде кислорода на уровне 7 мг/дм<sup>3</sup>, в 7 раз увеличивается скорость снижения нефти в нефтезагрязненных отложениях. Для повышения эффективности очистки нефтезагрязненных донных отложений с помощью червей, целесообразно включать в технологические схемы дополнительную аэрацию придонных слоев воды.

4. Процессы биотурбации играют одну из основных ролей при очистке донных отложений от нефти и нефтепродуктов. Тубифициды активно перемешивают донные отложения, что достоверно доказано изучением мощности слоев отложений с тубифицидами и без них. Ил, прошедший через кишечник лимнодрилусов, имеет на 22,4–25,0 % более низкое содержание нефти, чем исходный. Снижение концентрации связано с ферментативными и бактериальными процессами, проходящими в кишечнике червя.

5. Температура воды не оказывала достоверного влияния на процессы деструкции нефти в илах в присутствии червей-тубифицид. Высокие темпы очистных процессов проходящих в илах при низких температурах воды расширяет перспективы использования технологии очистки донных отложений от нефти с использованием червей-тубифицид в зимний период. Для эффективной реализации очистных мероприятий в зимний период требуется поддержание растворенного в воде кислорода не менее 5–6 мг/л.

6. Анализ выживаемости взрослых лимнодрилусов в условиях нефтяного загрязнения донных отложений, в разных кислородных условиях (от 0,8 до 9,0 мг/л кислорода), показал общий максимум выживаемости червей (77–95 %) в концентрации нефти 3–4 г/кг.



7. Наибольшее количество молодежи лимнодрилусов отмечено в донных отложениях с содержанием нефти 6,5 г/кг. Наибольшие показатели плодовитости червей наблюдались при содержании нефти в донных отложениях 2–7 г/кг.

8. В результате комплексной очистки водных объектов от нефти и нефтепродуктов активизируются процессы восстановления естественной гидрофауны водоема, что отражается на количественных и качественных характеристиках макрозообентоса, ихтиофауны. В результате очистных работ на озере Щучье № 1 в 2004 г., на деградированных участках донных отложений, в 2005 г. отмечены организмы макрозообентоса – олигохеты, двустворчатые и брюхоногие моллюски, хириномиды, водные клещи, пиявки, стрекозы и поденки.

9. На детритно-илистых донных отложениях в силу высокой сорбционной способности органогенных грунтов способом очистки воды и донных отложений водоемов от нефти и нефтепродуктов, возможно снижение нефти в 10-см слое отложений до уровня  $3,3 \pm 0,3$  г/кг и ниже. На песчано-илистых донных отложениях с использованием технологической схемы очистки на основе флотации способом очистки воды и донных отложений водоемов от нефти и нефтепродуктов возможно снижение нефти в 10-см слое отложений до уровня  $70,2 \pm 17,9$  мг/кг.

10. Начальное содержание нефти в донных отложениях не влияет на качество очистных работ. Важным аспектом является распределение «мобильной» нефти в донных осадках. Максимальное снижение нефти в донных отложениях флотационной технологией происходит на участках, где слой нефти находится на поверхности донных отложений. На участках донных отложений, которые испытывали механическое воздействие на грунт и были перемешаны с нефтью, требуется проведение дополнительных мероприятий по снижению нефти в толще донных осадков на глубину проникновения нефти.

### **ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

1. Для очистки сильнозагрязненных нефтью донных отложений водных объектов, на участках с «мобильной» донной нефтью (слой нефти и/или агрегаты) рекомендуется использовать флотационные технологии очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов, как биологически обоснованные и экономически приемлемые. Технология на основе флотации нефти применима на различных типах донных отложений (ил, песок, детрит и др.). Применение технологии возможно при любом загрязнении донных отложений нефтью и нефтепродуктами, от мелких вкраплений нефти, до слоя нефти на поверхности отложений неограниченной мощности.

2. Способом биологической очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов с использованием червей-тубифицид (Воробьев и др., Патент РФ № 2357929) рекомендовано производить снижение остаточного содержания нефти и нефтепродуктов в донных отложениях, в которых отсутствует «мобильная» нефть, что связано с сорбционными свойствами разнотипных донных отложений.

3. Устройство для очистки толщ и придонных слоев воды от нефти (Воробьев, Патент РФ № 88688) рекомендуется использовать на нефтесодержащих водотоках, располагая их ниже по течению от источника загрязнения. Устройство создает воздушно-пузырьковый заслон по всему сечению реки и поднимает на поверхность воды нефтяные агрегаты, которые передвигаются в толще и придонных слоях. На поверхности следует производить локализацию нефти с использованием боновых

заграждений или других устройств с последующей откачкой нефти и/или нефтепродукта.

4. Установка для очистки воды (Воробьев, Патент РФ № 80693) позволяет производить очистку всей толщи воды (от дна до поверхности) от любых загрязнителей, в зависимости от сорбционной загрузки секций устройства. Установка не создает препятствий для прохождения рыб и других гидробионтов в следствии их расположения в шахматном порядке на водотоке. Сорбционная загрузка является субстратом для развития аборигенной микрофлоры, что активизирует процессы очистки воды.

5. Для сбора нефти и плавающего мусора с поверхности стоячих и слабопроточных водоемов рекомендуется использовать устройство (Воробьев, Патент РФ № 112217), которое работает автономно, под действием ветра. При наличии загрязнителей, находящихся на поверхности воды, под воздействием ветра происходит их перемещение. Устройство, установленное на водоеме, при наличии ветра «открывается» и пассивно ловит все объекты, передвигающиеся по поверхности воды в зоне его работы. При отсутствии ветра, устройство само закрывается и удерживает уловленные объекты. Качество очистки поверхности воды от любых загрязнителей зависит от количества установленных устройств на водоеме. Использование устройства не требует постоянного присутствия оператора, что существенно снижает затраты на сбор нефти и плавающих загрязнителей с поверхности водоема.

6. На обводненных участках земли и водных объектах, где производятся работы по комплексной очистке от нефти и/или нефтепродуктов, для оценки качества донных отложений и оценки эффективности очистных мероприятий рекомендуется использовать мобильный прибор «аэрощуп» (Патент РФ № 92541). Устройство позволяет визуально (на месте) провести экспресс-оценку качества донных отложений по шкале визуальной оценки степени загрязненности донных отложений на наличие мобильной нефти, а также провести картографирование донных отложений по степени их загрязненности. Использование аэрощупа позволяет многократно увеличить площади обследования дна или обводненного участка на наличие нефти без отбора проб дночерпателями, что многократно экономит время специалиста-исследователя и средства Заказчика работ.



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Монография:

1. Туманов М.Д., **Воробьев Д.С.**, Мартынов В.Г. Сиговые рыбы нижнего течения реки Усы в условиях техногенного загрязнения / под ред. В.И. Романова. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2013. – 212 с. – 13,25 / 5,3 п.л.

### Учебное пособие:

2. Залозный Н.А., **Воробьев Д.С.** Олигохеты и пиявки водоемов Западной Сибири: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2006. – 216 с. – 13,09 / 3,93 п.л.

Статьи, опубликованные в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:

3. **Воробьев Д.С.**, Попков В.К. Нефтепродукты в воде и донных отложениях бассейна реки Васюган // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 4. – С. 48–50. – 0,17 / 0,14 п.л.

4. Лушников С.В., **Воробьев Д.С.**, Фадеев В.Н. Очистка донных отложений: первый шаг сделан // Экология и промышленность России. – 2005. – № 9. – С. 30–31. – 0,12 / 0,08 п.л.

5. **Воробьев Д.С.** Влияние нефти и нефтепродуктов на макрозообентос // Известия Томского Политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 3. – С. 42–45. – 0,22 п.л.

6. Лушников С.В., **Воробьев Д.С.** Очистка донных отложений от нефти: результаты экспериментальных работ // Экология и промышленность России. – 2006. – № 10. – С. 11–13. – 0,18 / 0,15 п.л.

7. **Воробьев Д.С.**, Туманов М.Д., Носков Ю.А., Лушников С.В., Франк Ю.А. Икhtiоиндикационная оценка эффективности мероприятий по очистке донных отложений и воды оз. Щучье от нефти (Усинский район, Республика Коми) // Проблемы региональной экологии. – 2008. – № 1. – С. 125–130. – 0,33 / 0,16 п.л.

8. **Воробьев Д.С.**, Лушников С.В., Фадеев В.Н., Лушников В.С., Франк Ю.А. Опыт комплексной очистки обводненных карьеров от нефти // Проблемы региональной экологии. – 2008. – № 4. – С. 26–28. – 0,16 / 0,09 п.л.

9. **Воробьев Д.С.**, Франк Ю.А., Залозный Н.А., Лушников С.В., Сидорская С.Н. Перемещение *Limnodrilus hoffmeisteri* (Oligochaeta, Tubificidae) в нефтезагрязненных илах // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2008. – № 1 (2). – С. 82–89. – 0,45 / 0,36 п.л.

10. **Воробьев Д.С.**, Франк Ю.А., Залозный Н.А., Лушников С.В., Ступакова Л.П. К вопросу устойчивости *Limnodrilus hoffmeisteri* (Oligochaeta, Tubificidae) к нефтяному загрязнению // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2008. – № 2 (3). – С. 83–88. – 0,33 / 0,27 п.л.

11. **Воробьев Д.С.**, Залозный Н.А., Франк Ю.А., Лушников С.В., Носков Ю.А. К вопросу о роли тубифицид в потреблении кислорода в донных отложениях, загрязненных нефтью // Известия Самарского научного центра РАН. – 2009. – Т. 11, № 1 (4). – С. 702–706. – 0,30 / 0,24 п.л.

12. **Воробьев Д.С.**, Франк Ю.А., Лушников С.В., Залозный Н.А., Носков Ю.А. Использование *Limnodrilus hoffmeisteri* (Tubificidae, Oligochaeta) в очистке донных отложений от нефти и нефтепродуктов // Сибирский экологический журнал. – 2010. – № 1. – С. 21–27. – 0,36 / 0,29 п.л.

13. Франк Ю.А., Лушников С.В., Иванова Е.И., **Воробьев Д.С.** Проектирование и реализация работ по очистке нефтезагрязненных водных объектов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2010. – № 2. – С. 101–110. – 0,58 / 0,12 п.л.

14. **Воробьев Д.С.** Интенсификация процессов деструкции нефти в илах аэрации // Вестник Томского государственного университета. – 2011. – № 351. – С. 152–154. – 0,18 п.л.

15. **Воробьев Д.С.**, Досанов С.С. Аэроцуп: устройство для оценки загрязненности донных отложений нефтью и нефтепродуктами // Экологические системы и приборы. – 2011. – № 10. – С. 35–38. – 0,18 / 0,15 п.л.

16. **Воробьев Д.С.** К вопросу о перемещении тубифицид в нефтезагрязненных илах // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2011. – № 11. – С. 47–51. – 0,24 п.л.

17. **Воробьев Д.С.**, Франк Ю.А., Лушников С.В. Влияние плотности *Limnodrilus hoffmeisteri* на процессы очистки донных отложений от нефти // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2012. – № 4 (20). – С. 195–202. – 0,48 / 0,39 п.л.

*Патенты на изобретения и полезные модели:*

18. Лушников С.В., Фадеев В.Н., **Воробьев Д.С.** Способ очистки воды и донных отложений водоемов от нефти и нефтепродуктов. Патент Евразийский № 009507. Патентообладатели: Лушников С.В., Фадеев В.Н., Воробьев Д.С. заявлено 14.12.2004; опубликовано: 28.02.2008. – 4 с. – 0,24 / 0,07 п.л.

19. **Воробьев Д.С.**, Залозный Н.А., Лушников С.В., Франк Ю.А. Способ биологической очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов. Патент РФ № 2357929. Изобретение. Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-техническое общество «Приборсервис», (заявка: 2007124025/13, 26.06.2007; опубликовано: 10.06.2009). – Бюл. № 5. – 6 с. – 0,33 / 0,17 п.л.

20. **Воробьев Д.С.** Установка для очистки воды. Патент РФ №80693. Полезная модель. Патентообладатель: Открытое акционерное общество «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа» (ОАО «ТомскНИПИнефть»), (заявка: 2008129971/22, 21.07.2008; опубликовано: 20.02.2009). – Бюл. № 5. – 2 с. – 0,12 п.л.

21. **Воробьев Д.С.** Устройство для очистки толщи и придонных слоев воды от нефтяных загрязнений. Патент РФ № 88688. Полезная модель. Патентообладатель: Открытое акционерное общество «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа» (ОАО «ТомскНИПИнефть»), (заявка: 2009106549/22, 24.02.2009; опубликовано: 20.11.2009). – Бюл. № 32. – 2 с. – 0,12 п.л.

22. **Воробьев Д.С.** Система очистки донных отложений водоемов от нефти и/или нефтепродуктов. Патент РФ № 2381994. Изобретение. Патентообладатель: Открытое акционерное общество «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа» (ОАО «ТомскНИПИнефть»), (заявка: 2008122664/15, 04.06.2008; опубликовано: 20.02.2010). – Бюл. № 5. – 7 с. – 0,36 п.л.

23. **Воробьев Д.С.** Устройство для оценки загрязненности донных отложений водной среды нефтью и нефтепродуктами (аэроцуп). Патент РФ №92541. Полезная модель. Патентообладатель: Открытое акционерное общество «Томский научно-



исследовательский и проектный институт нефти и газа» (ОАО «ТомскНИПИнефть»), (заявка: 2009141679/22, 11.11.2009; опубликовано: 20.03.2010). – Бюл. № 8. – 1 с. – 0,06 п.л.

24. **Воробьев Д.С.** Устройство для сбора нефти и иных плавающих загрязнителей. Патент РФ № 112217. Полезная модель. Патентообладатель: Открытое акционерное общество «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа» (ОАО «ТомскНИПИнефть»), (заявка: 2011133387/13, 09.08.2011; опубликовано: 10.01.2012). – Бюл. № 1. – 2 с. – 0,12 п.л.

*Публикации в других научных изданиях:*

25. Попков В.К., **Воробьев Д.С.**, Лукьянцева Л.В., Рузанова А.И. Особенности оценки экологического состояния рек в нефтепромысловых районах // *Материалы международной научно-практической конференции «Экологические, гуманитарные и спортивные аспекты подводной деятельности»*. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1999. – С. 106–109. – 0,13 / 0,04 п.л.

26. Рузанова А.И., **Воробьев Д.С.** Трансформация донных сообществ в условиях нефтяного загрязнения // *Экология пойм сибирских рек и Арктики* / под ред. В.В. Зуева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – С. 71–78. – 0,39 / 0,20 п.л.

27. Рузанова А.И., **Воробьев Д.С.** Оценка экологического состояния реки Васюган по донным сообществам // *Материалы международной конференции «Экология и рациональное природопользование на рубеже веков. Итоги и перспективы»*: в 2 т. – Томск, 2000. – Т. 2. – С. 202–204. – 0,2 / 0,12 п.л.

28. **Воробьев Д.С.** Распределение макрозообентоса в условиях нефтяного загрязнения (р. Васюган) // *Материалы Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология на рубеже веков»*. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2000. – С. 40–42. – 0,12 п.л.

29. Рузанова А.И., **Воробьев Д.С.** Состояние донных сообществ бассейна реки Ягыльях (район нефтяных месторождений) // *Экобиотехнология: борьба с нефтяным загрязнением окружающей среды*. – Пушкино: ИБФМ РАН, 2001. – С.14–16. – 0,15 / 0,08 п.л.

30. Попков В.К., **Воробьев Д.С.**, Лукьянцева Л.В., Рузанова А.И. Бассейн реки Васюган (средняя Обь) как модель пойменно-речной системы для изучения влияния нефтяного загрязнения на водные сообщества // *Эколого-биогеохимические исследования в бассейне Оби*. – Томск, 2002. – С. 220–245. – 1,52 / 0,45 п.л.

31. Лушников С.В., Фадеев В.Н., **Воробьев Д.С.** Очистка озера, сильно загрязненного нефтяными разливами: пилотный проект в республике Коми (Россия) // *Сборник докладов 4-го Международного конгресса по управлению отходами «ВэйсТгэк-2005»*. – Москва: Фирма «СИБИКО Интернэшл», 2005. – С. 396–397. – 0,12 / 0,06 п.л.

32. Лушников С.В., **Воробьев Д.С.**, Фадеев В.Н. Перспективы использования флотационной технологии очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов прибрежных морских зон и портов // *Материалы Международной конференции «Морская экология – 2005»*, Владивосток, 5–7 октября 2005 г. – Владивосток: «Центр рекламных услуг», 2005. – С. 135–138. – 0,24 / 0,17 п.л.

33. Lushnikov S.V., Frank Y.A., **Vorobyov D.S.** Oil Decontamination of Bottom Sediments Experimental Work Results // *Earth Sciences Research Journal*. – 2006. – Vol. 10, № 1. – P. 35–40. – 0,36 / 0,11 п.л.

34. Лушников С.В., Терещенко Н.Н., **Воробьев Д.С.**, Франк Ю.А. Опыт применения инновационных технологий биоремедиации природных сред, загрязненных нефтью и нефтепродуктами // *Материалы IV Международного конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития»*, Москва, 12–16 марта 2007 г. – Москва, 2007. – С. 131. – 0,06 / 0,01 п.л.

35. **Воробьев Д.С.** Биоиндикационная оценка некоторых водотоков бассейна рек Васюган и Парабель (Средняя Обь) // *Материалы Всероссийской конференции «Биологические аспекты рационального использования и охраны водоемов Сибири»*, Томск, 14–16 ноября 2006 г. / под ред. В.И. Романова. – Томск: «Лито-Принт», 2007. – С. 33–39. – 0,39 п.л.

36. Лушников С.В., **Воробьев Д.С.**, Фадеев В.Н., Носков Ю.А., Франк Ю.А. Очистка водных объектов от нефти // *Материалы Всероссийской конференции «Биологические аспекты рационального использования и охраны водоемов Сибири»*, Томск, 14–16 ноября 2006 г. / под ред. В.И. Романова. – Томск: «Лито-Принт», 2007. – С. 183–185. – 0,18 / 0,13 п.л.

37. **Воробьев Д.С.**, Франк Ю.А., Лушников С.В. Перспективность использования червей семейства Tubificidae для очистки нефтезагрязненных донных отложений // *Материалы Пятого московского международного конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития»*, Москва, 16–20 марта, 2009 г. – М.: ЗАО «Экспобихимтехнологии», РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2009. – С. 251–252. – 0,05 / 0,04 п.л.

38. **Воробьев Д.С.** Установка для очистки водотоков от загрязнений // *Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии»*, Томск, 19–21 октября 2009 г. – Томск: изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2009. – С. 409–410. – 0,03 п.л.

39. **Vorobiev D.S.**, Frank Y.A., Lushnikov S.V., Zalozny N.A. The possibility of using Oligochaeta worms for cleaning up of benthic sediments from oil and petroleum hydrocarbons // *Geomina (Venezuela)*. – 2009. – V. 37, № 50. – P. 227–230. – 0,21/0,17 п.л.

40. Франк Ю.А., Лушников С.В., **Воробьев Д.С.**, Монголина Т.А., Лукьянцева Л.В., Носков Ю.А. О необходимости комплексного подхода к обследованию нефтезагрязненных водных объектов для принятия управленческих и технологических решений по их очистке // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. – 2009. – № 3. – С. 64–71. – 0,48 / 0,12 п.л.

41. **Воробьев Д.С.** Перспективы использования аэрошуапа для оценки загрязненности донных отложений нефтью // *Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения профессора, заслуженного деятеля науки Российской Федерации Б.Г. Иоганзена и 80-летию со дня основания кафедры ихтиологии и гидробиологии ТГУ*, Томск, 19–21 апреля 2011 г. – Томск, 2011. – С. 324–326. – 0,09 п.л.

42. **Воробьев Д.С.** Перспективы использования *Limnodrilus hoffmeisteri* (Oligochaeta, Tubificidae) в биоремедиации // *Сборник материалов международной научной конференции «Природно-техногенные комплексы: рекультивация и устойчивое функционирование»*, Новосибирск, 10–15 июня 2013 г. / отв. ред. В.А. Андрюханов. – Новосибирск: Изд-во Окрина, 2013. – С. 283–285. – 0,12 п.л.