

Санкт-Петербургский государственный университет

***РУДАКОВА Ольга Александровна***  
**Выпускная квалификационная работа**

**Наилучшие доступные технологии и их применение в качестве инструмента  
обеспечения экологической безопасности вод Финского залива**

Бакалавриат  
Направление 05.03.06 «Экология и природопользование»  
Основная образовательная программа СВ.5024 «Экология и природопользование»  
Профиль Экологическая безопасность

Научный руководитель: д. т. н., ст. н. с.  
профессор Холодкевич С.В.

Рецензент: к. б. н., ст. н. с.  
Кузнецова Т.В.

Санкт-Петербург

2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Глоссарий.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
<b>ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....</b>	<b>8</b>
1.1. Понятие наилучшей доступной технологии (НДТ), ее суть и области применения.....	8
1.2. Мероприятия по переходу на систему наилучших доступных технологий.....	9
1.2.1. Основные предпосылки перехода на НДТ.....	9
1.2.2. Совершенствование нормативно-правовой базы по переходу на НДТ.....	11
1.2.3. Последовательность перехода на НДТ.....	13
1.2.4. Государственная поддержка и стимулирование деятельности по внедрению НДТ.....	14
1.3. Опыт применения НДТ в биомониторинге состояния окружающей среды и обеспечении экологической безопасности.....	16
1.3.1. Европейский опыт.....	16
1.3.2. Российский опыт.....	18
1.4. Проблема загрязнения водных экосистем Восточной части Финского залива.....	19
1.4.1. Загрязнения водных экосистем Восточной части Финского залива очищенными сточными водами.....	19
1.4.2. Мониторинг загрязнения восточной части Финского залива недостаточно очищенными сточными водами.....	23
1.5. Понятие, сущность и методы биоиндикации загрязнений водных экосистем.....	27
1.6. Системы раннего биологического предупреждения.....	29
1.6.1. Современные системы раннего биологического предупреждения (СРБП) об экологической опасности.....	30
1.6.2. Очистные сооружения г. Санкт-Петербурга, технологии и методы очистки сточных вод.....	34

<b>ГЛАВА 2. ОБЗОР БИОЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОДОВ И СИСТЕМ БИОТЕСТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОРГАНИЗМОВ-БИОИНДИКАТОРОВ.....</b>	<b>38</b>
2.1. Системы MosselMonitor и DreissenaMonitor как системы раннего биологического предупреждения и контроля состояния окружающей среды .....	38
2.2. Microtox – система мониторинга токсичности водной среды с использованием микроорганизмов.....	39
2.3. Система биомониторинга с использованием рыб Fish-Toximeter.....	42
2.4. Система биомониторинга с использованием водорослей Algae Toximeter II.....	45
2.5. Использование системы DaphTox II.....	46
2.6. Биоэлектронная система мониторинга кардиоактивности раков .....	47
<b>ГЛАВА 3. ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КАРДИОАКТИВНОСТИ МОЛЛЮСКОВ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА В РЕКРЕАЦИОННЫХ АКВАТОРИЯХ КУРОРТНОГО РАЙОНА Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА.....</b>	<b>50</b>
3.1. Физико-географическое описание района исследований в Финском заливе.....	50
3.2. Исследование кардиоактивности моллюсков-биоиндикаторов .....	55
3.3. Обработка и анализ характеристик кардиоритма моллюсков.....	62
3.4. Особенности кардиоответов моллюсков из разных акваторий Финского залива как показатели степени хронического загрязнения мест обитания этих моллюсков.....	63
<b>ВЫВОДЫ.....</b>	<b>70</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>71</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>72</b>

## Глоссарий

НДТ – наилучшая доступная технология

НСТ – наилучшая существующая технология

КЭР – комплексное экологическое разрешение

ЕС – Европейский союз

ОЭСР – Организация экономического сотрудничества и развития

НИЦЭБ РАН – Научно-исследовательский центр экологической безопасности

Российской академии наук

СРБП – системы раннего биологического предупреждения

ПДК – предельно-допустимая концентрация

ЧСС – частота сердечных сокращений

РОВ – растворенные органические вещества

ХПК – химическое потребление кислорода

ЛВОФ – лазерный волоконно-оптический фотоплетизмограф

СПБМКВ – система производственного биологического мониторинга качества

воды

ВС – водопроводная станция

ЮЗОС – Юго-Западные очистные сооружения

ВРС – величина раскрытия створок

ХЕЛКОМ – Хельсинская Комиссия

НВОС – негативное воздействие на окружающую среду

ИИС – информационно-измерительные системы

СФУ – Сибирский федеральный университет

ОПЗФ – относительный показатель интенсивности замедленной флуоресценции

АСНЭМ – Автоматическая система непрерывного экологического (физико-химического) мониторинга

ВТО – Всемирная торговая организация

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается систематическое повышение уровня негативного воздействия на окружающую среду. Загрязнение природной среды отходами производственной деятельности, природные и техногенные катастрофы оказывают пагубное влияние не только на здоровье человека, но и нарушают целостность экосистем.

Как правило, большинство выбросов в окружающую среду может происходить в результате природных процессов и не приносить ей особого вреда за счет минимальных концентраций вредных веществ (их концентрации снижаются в результате рассеивания, поглощения, растворения). Исключения составляют природные катастрофы или опасные природные явления (землетрясения, наводнения, оползни, сильный ветер, засуха и др.).

В то же время высокий уровень износа технических средств в промышленности, отсутствие высокоэффективных очистных сооружений требуемой мощности, выбросы выхлопных газов при эксплуатации строительной техники и другие антропогенные факторы способствуют ухудшению состояния воздушного и водного бассейнов и требуют принятия безотлагательных мер по предотвращению их загрязнения.

Вместе с тем в настоящее время происходит глобальная экологизация международных отношений и многих аспектов внутригосударственной политики жизни и международных отношений, что наиболее ярко выражено в странах Европы. Соседское положение Российской Федерации с государствами, внедряющими более совершенные методы и технические системы при решении проблем экологического мониторинга и охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности, требует повышенного внимания к разработке и использованию новых технологий и в России.

Однако существующая практика регулирования отношений в сфере охраны окружающей среды, а также методы экологического нормирования и контроля, показали неэффективность системы российского природоохранного законодательства и его несоответствие международным принципам и тенденциям (Ребрик И.И., 2009).

В связи с этим в настоящее время в России разработан ряд законодательных актов, направленных на государственную поддержку и стимулирование деятельности по внедрению наилучших доступных технологий (НДТ) и осуществление перехода российской промышленности на новые принципы нормирования воздействия на окружающую среду, которые предполагают использование НДТ. Их особенностью

является минимизация ущерба окружающей среде при экономически приемлемых затратах (Бегак М.В., Манвелова А.Б., 2013)

В последние несколько лет в НИЦЭБ РАН под руководством профессора Холодкевича С.В. был разработан метод оценки функционального состояния макробентосных беспозвоночных с жестким наружным покровом (высших раков и моллюсков). На основе этого метода была предложена инновационная технология биоиндикации состояния экосистем акваторий, в которых обитали данные животные, которая была опробована в ряде отечественных и международных проектов. В частности, при использовании этой технологии было обнаружено, что в акватории напротив парка «Дубки» в Сестрорецке, которая расположена в относительной близости от выпусков очищенных сточных вод Северной Станции Аэрации ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», функциональное состояние моллюсков значительно выше, чем в курортных акваториях Репино, Комарово, Зеленогорска, расположенных значительно дальше от Санкт-Петербурга. Была высказана гипотеза, что такой парадоксальный, на первый взгляд, эффект связан с тем, что на берегах этих рекреационных акваторий расположен ряд пансионатов, кафе и ресторанов, локальные очистные сооружения сточных вод которых функционируют недостаточно эффективно.

Для проверки данной гипотезы основным объектом исследования в данной работе была выбрана акватория вблизи поселка Ушково, расположенного всего в нескольких километрах от Зеленогорска. Однако отличительной особенностью этой акватории является то, что вблизи от ее берега отсутствуют точки общепита и пансионаты. Кроме того, даже коттеджи и загородные жилые дома поселка Ушково расположены довольно далеко от берега - на высокой песчаной возвышенности.

Цель работы состояла в том, чтобы применить эту инновационную технологию биоиндикации для оценки состояния экосистемы акватории вблизи поселка Ушково. В случае получения положительного результата это стало бы наглядной демонстрацией того, что данную технологию можно рассматривать как российскую наилучшую доступную технологию объективной оценки антропогенного воздействия на рекреационные акватории побережья Восточной части Финского залива.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

- обозначить и объяснить выбор того или иного пункта исследования в Восточной части Финского залива;
- отобрать биоиндикаторные виды пресноводных двустворчатых моллюсков, обитающих в исследуемых участках Финского залива, пригодных для биоэлектронных систем;

- выявить особенности кардиоактивности этих моллюсков;
- связать эти особенности функционирования кардиосистемы местных моллюсков с условиями хронического загрязнения среды их обитания.

Одной из задач данной работы являлся обзор существующих в настоящее время методик биоиндикации и биомониторинга (системы раннего биологического предупреждения, далее СРБП), которые широко применяются или находятся на стадии апробации и развития в различных странах мира. Внимание акцентировалось также на методологии биоиндикации состояния водных экосистем, разработанной в НИЦЭБ РАН и применяемой в настоящее время.

## ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

### 1.1. Понятие наилучшей доступной технологии, ее суть и области применения

Понятие «наилучших доступных технологий» определено в Директиве ЕС «О комплексном предотвращении и контроле загрязнений» (Директива IPPC): «Наилучшие доступные технологии означают самую эффективную и передовую стадию развития производственной деятельности и методов эксплуатации установок, которая свидетельствует о практической пригодности определенных технологий для создания принципиальной основы для обеспечения предельных величин эмиссий, направленных на предотвращение и, если это невозможно, общее сокращение эмиссий и ослабление воздействия на окружающую среду в целом» (Directive EC, 2008).

В данном определении слово «технология» может быть понято двусмысленно: это используемая на конкретном объекте технология, а также способ, с помощью которого объект спроектирован, построен, эксплуатируется и выводится из эксплуатации. Технологию можно назвать «доступной», если она достигла уровня, который делает возможным ее внедрение в соответствующем секторе промышленности, учитывая при этом экономическую и техническую обоснованность и принимая во внимание расходы и преимущества. Здесь имеются в виду технологические процессы, технические решения (к примеру, техника защиты окружающей среды), а также подходы к управлению предприятиями. Более выигрышными являются интегрированные решения, встроенные в технологический процесс, направленные, таким образом, на предотвращение негативного воздействия.

Для того чтобы технология считалась наилучшей, она должна обеспечивать оптимальное (с позиции минимизации ущерба, причиняемого окружающей среде) соотношение между выбросами, сбросами, размещенными отходами и физическими воздействиями (Бегак М.В. и др., 2010).

В настоящее время наилучшие доступные технологии (Best Available Techniques, BAT) являются инструментом обеспечения экологической безопасности. Разработка и реализация концепции наилучших доступных технологий (НДТ) и комплексных экологических разрешений (КЭР) ведется с 70-х годов XX века. В Европейском Союзе получение КЭР и свидетельствование соответствия требованиям НДТ – обязательное условие для работы крупных предприятий ключевых отраслей экономики еще с 1996 года.

В Российской Федерации переход к технологическому нормированию предприятий в сфере охраны окружающей среды осуществляется в соответствии с Федеральным Законом от 21 июля 2014 г. № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Законодательно в Российской Федерации закреплено следующее определение НДТ: «Наилучшая доступная технология – технология производства продукции (товаров), выполнения работ, оказания услуг, определяемая на основе современных достижений науки и техники и наилучшего сочетания критериев достижения целей охраны окружающей среды при условии наличия технической возможности ее применения» (<http://ecoline.ru>).

## **1.2. Мероприятия по переходу на систему наилучших доступных технологий**

### **1.2.1. Основные предпосылки перехода на НДТ**

Переход России от энергосырьевой экономики к инновационной модели и вход России во Всемирную торговую организацию (ВТО) создал необходимость формирования экономически сбалансированного и взвешенного подхода государства к экологическим проблемам.

Основные принципы такого подхода изложены в специальном документе – Основах экологической политики Российской Федерации до 2030 года, разработка которого ведется во исполнение поручений Президента РФ органами государственной и муниципальной власти с участием научных и общественных организаций.

Для повышения эффективности экономики необходимо совершенствовать существующие законодательные акты, а также разрабатывать и принимать новые законы, которые позволили бы принимать действенные меры по сохранению окружающей среды и рациональному использованию природных ресурсов. Как показывает европейский и мировой опыт, в настоящее время главным административным инструментом решения поставленных задач является выдача промышленным предприятиям комплексных экологических разрешений (КЭР) на выбросы, сбросы и размещение отходов на основе технологического нормирования с использованием наилучших существующих технологий (НСТ). В соответствии с принципом НСТ, нормирование негативного воздействия на окружающую среду должно базироваться на технологиях, отвечающих последним экономически

доступным достижениям науки при минимальном уровне воздействия на экосистемы (<http://roswaste.ru>).

КЭР является документом, который позволяет предприятиям воздействовать на окружающую среду в тех пределах, которые не превышают нормативов эмиссий, соответствующих НДТ и не ухудшают состояние окружающей среды (Бегак М.В. и др., 2010).

Выдача КЭР предусмотрена Федеральным законом от 21.07.2014 № 219-ФЗ и является существенным нововведением в области государственного контроля. Получение КЭР является обязательным для объектов со значительным воздействием на окружающую среду. К ним, прежде всего, относятся предприятия следующих отраслей промышленности: энергетика, переработка угля, нефти и газа, производство и обработка металлов, горнодобывающая промышленность, химическая и целлюлозно-бумажная промышленность, сельскохозяйственный комплекс и др. КЭР выдается уполномоченным федеральным органом исполнительной власти и содержит обязательные для выполнения требования в области охраны окружающей среды (Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» глава 5, ст. 31.1). Введение этого документа заменяет необходимость получения нескольких экологических разрешений и согласований – на выбросы, сбросы, размещение отходов и т. д.

Для того чтобы получить комплексное экологическое разрешение компания должна предоставить заявку. В ней следует отразить расчеты технологических нормативов, расчеты нормативов предельно допустимых выбросов, нормативов допустимых сбросов высокотоксичных и канцерогенных веществ (при их наличии), а также обосновать нормативы образования отходов и лимиты на их размещение (Лукин В., Головкин А., 2017).

Кроме того, с 1 января 2019 года к заявке необходимо приложить проект программы повышения экологической эффективности, а также планируемые временно разрешенные выбросы (сбросы) с указанием массы или объема выбросов загрязняющих веществ на текущий момент, на период реализации программы повышения экологической эффективности и после ее реализации (Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» глава 5, ст. 31.1).

С 1 января 2019 года статьей 31.1 Федерального закона «Об охране окружающей среды» введена обязанность получения КЭР для юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, осуществляющих свою деятельность на объектах I категории. Такое

разрешение должно быть получено на отдельный объект, оказывающий негативное воздействие на окружающую среду.

КЭР выдается сроком на 7 лет и затем может быть продлено на тот же срок при совокупности условий:

- соблюдения установленных технологических нормативов, нормативов допустимых выбросов (сбросов) токсичных веществ;
- отсутствия задолженности по плате за негативное воздействие на окружающую среду;
- своевременного предоставления отчетности о выполнении программы производственного экологического контроля, уведомлений об авариях, повлекших за собой негативное воздействие на окружающую среду;
- выполнения программы повышения экологической эффективности в установленные сроки (при ее наличии).

В случаях изменения технологических процессов, замены сырья, оборудования, которые повлекли за собой изменение установленных объемов выбросов (сбросов) загрязняющих веществ, а также лимитов на размещение отходов производства и потребления КЭР подлежит пересмотру частично или полностью.

### **1.2.2. Совершенствование нормативно-правовой базы по переходу на НДТ**

Совершенствование системы нормирования и внедрение НДТ невозможно без формирования соответствующей правовой базы (Ребрик И.И., 2009).

Для того чтобы реализовать уже имеющиеся нормы законов, необходимо подготовить целую систему новых подзаконных нормативно-правовых актов, а также внести изменения и в действующие федеральные законы.

В настоящее время необходимость использования НДТ с целью снижения негативного воздействия на окружающую среду регламентируется различными законодательными и нормативными актами различного уровня, а также ведомственными документами.

Так, например, на федеральном уровне руководствуются положениями Федерального закона «Об охране окружающей среды», предусматривающими осуществление хозяйственной и иной деятельности на основе принципов обеспечения снижения негативного влияния на окружающую среду. Также данным Законом установлено, что при проектировании зданий, сооружений и иных объектов должны применяться «ресурсосберегающие, малоотходные, безотходные и иные наилучшие

существующие технологии, способствующие охране окружающей среды, восстановлению природной среды, рациональному использованию и воспроизводству природных ресурсов» (статья 36 Закона).

Также Президентом РФ утверждены Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года, приняты Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года, Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, Концепция развития особо охраняемых природных территорий федерального значения на период до 2020 года (<http://kremlin.ru>).

На региональном уровне также существует система нормативных актов, устанавливающих требования к внедрению НДТ на промышленных предприятиях. Так, например, Закон Томской области об охране атмосферного воздуха устанавливает ответственность собственника за нарушение требований, установленных данным Законом и законодательством РФ в области охраны атмосферного воздуха. А Закон Пермской области об охране окружающей среды содержит положение о том, что организации и индивидуальные предприниматели обязаны предусматривать мероприятия по предупреждению и устранению негативного воздействия на окружающую среду, а также обеспечивать экологически безопасное размещение отходов и рационально использовать природные ресурсы (Бегак М.В. и др., 2010).

Постановление Правительства Москвы о мероприятиях по снижению выбросов содержит требование осуществлять формирование планов мероприятий по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на основании результатов экологического аудита и оценки соответствия процессов производства и эксплуатации наилучшим существующим технологиям.

Требования к внедрению НДТ могут устанавливаться также и на муниципальном уровне соответствующими муниципальными актами.

В ходе совершенствования системы нормирования основные меры должны быть направлены не на ужесточение административной ответственности и увеличение платы за негативное воздействие на окружающую среду, а на нормативно-правовое оформление порядка установления обоснованных нормативов, а также процедуры перехода предприятий на НДТ (Ребрик И.И., 2009).

На федеральном и региональном уровне при внедрении НДТ предусматриваются меры экономического стимулирования.

Таким образом, подготовленная нормативно-правовая база будет являться основанием для начала переходного этапа на НДТ.

### 1.2.3. Последовательность перехода на НДТ

Переход предприятий на НДТ должен выполняться в следующей последовательности:

1. Оценка производственной деятельности предприятия и составление плана модернизации.

В том случае, если объем выбросов/сбросов предприятия не соответствует установленному нормативу предельно допустимого воздействия, необходимо составление плана модернизации. Такой план должен содержать описание производственной деятельности предприятия и этапы внедрения НДТ, выбранной из Перечня НДТ и достаточной для достижения нормативов допустимого воздействия.

2. Согласование плана модернизации и установление временно согласованных лимитов.

Разработанный план модернизации необходимо согласовать с полномочным территориальным органом управления, который может учесть природные особенности территории, на которой осуществляется деятельность предприятия, а также экономические, технологические и социальные факторы. В результате согласования плана модернизации в отношении предприятия будут установлены временно согласованные лимиты на выбросы/сбросы.

Кроме этого, будет согласована программа зачета средств, направляемых предприятием на модернизацию, в счет платы за негативное воздействие на окружающую среду.

3. Реализация плана модернизации и поэтапное внедрение НДТ.

В ходе реализации плана модернизации полномочный территориальный орган управления имеет право осуществлять контрольные мероприятия за соблюдением предприятием установленных лимитов и этапов модернизации.

Во время проведения модернизации не должны пересматриваться целевые нормативы предельно допустимых выбросов/сбросов. В результате внедрения НДТ должны быть достигнуты значения предельно допустимых нормативов, а производственная деятельность предприятия должна быть переведена на более экологически чистые технологии. С течением времени нормативы могут пересматриваться с целью стимулирования продолжения процесса модернизации и улучшения экологической обстановки в России (Ребрик И.И., 2009).

Таким образом, в результате применения механизма НДТ не только должен снизиться уровень загрязнения окружающей среды, но также должно произойти

ускоренное технологическое развитие предприятия. Предприятия, вынужденные принимать дополнительные меры по снижению на конкурентном уровне, будут вынуждены уделять особое внимание развитию технологий, повышению их эффективности, снижению всех возможных затрат. С внедрением механизма НДТ появится возможность не устанавливать единые для всех предприятий жесткие нормы, а учитывать разнообразные природные условия предприятий, состав применяемого сырья, производственные процессы и т.д. (Ребрик И.И., 2009).

#### **1.2.4. Государственная поддержка и стимулирование деятельности по внедрению НДТ**

Целью внедрения наилучших доступных технологий является снижение в процессе хозяйственной деятельности воздействия на окружающую среду путем внедрения новых, более эффективных методов производства и модернизации производственных процессов.

Поэтому для реализации этой цели новой редакцией Федерального закона «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ предусмотрен комплекс мер, стимулирующих предприятия к внедрению НДТ.

Основной принцип этих мер заключается в снижении размера платы за негативное воздействие вплоть до ее аннулирования для предприятий, активно внедряющих НДТ. То есть, если сброс или выброс загрязняющих веществ произведен в пределах технологических нормативов, то плата не взимается. В то же время для предприятий, не предпринимающих мер по модернизации своих производств или превышающих установленные нормативы сброса или выброса, плата за негативное воздействие должна увеличиваться в несколько раз (<http://www.nord-west-water.ru>).

Кроме того, компаниям, осуществляющим внедрение НДТ, предоставляются налоговые льготы в порядке, установленном законодательством РФ о налогах и сборах. В частности, возможно снижение срока амортизации средств, относящихся к основному технологическому оборудованию, согласно утвержденному Правительством Российской Федерации перечню основного технологического оборудования (Лукин В., Головкин А., 2017).

В Федеральном законе «Об охране окружающей среды» прописано, что налоговые и иные льготы предусмотрены и при использовании вторичных ресурсов и переработке отходов, а также при осуществлении ряда эффективных мер по защите окружающей среды.

Изменениями, внесенными в ФЗ № 7 от 10 января 2002 года «Об охране окружающей среды» на основании ФЗ № 219 от 21 июля 2014 года (с изменениями на 25 декабря 2018 г.) установлены новые требования по экологии для предприятий и организаций, с разграничением их на категории негативного воздействия с 1-й по 4-ю:

- 1 категория – объекты, оказывающие значительное негативное воздействие на окружающую среду и относящиеся к областям применения НДТ;

- 2 категория – объекты, оказывающие умеренное негативное воздействие на окружающую среду;

- 3 категория – объекты, оказывающие незначительное воздействие на окружающую среду;

- 4 категория – объекты, оказывающие минимальное негативное воздействие на окружающую среду.

Применение НДТ является актуальным для объектов 1 категории как наиболее опасных и оказывающих значительное воздействие на окружающую среду. Но с 1 января 2020 года будет отказано в выдаче разрешений на ввод в эксплуатацию объекта капитального строительства, если он относится к объектам негативного воздействия на окружающую среду (НВОС) и входит в область применения НДТ, но сами НДТ в его технологических процессах не реализованы (п.2 ст. 38 Закона «Об охране окружающей среды»). Поэтому внедрение НДТ должно быть осуществлено еще до постановки объекта НВОС на государственный учет и присвоения ему категории.

Было высказано предположение, что с 2019 года проектирование новых предприятий будет осуществляться только на основе НДТ, а с 2020 года к предприятиям будут применяться разрешительные меры (комплексное экологическое разрешение) (Храмова Н. С., 2016).

Поэтому стимул в виде ускоренной амортизации будет большим плюсом для всех предприятий, так как амортизационные отчисления относятся к расходам, уменьшающим налогооблагаемую базу при исчислении налога на прибыль, то есть это приведет к увеличению прибыли предприятия.

Для фактического перехода предприятий на НДТ необходимо разработать перечни НДТ и утвердить порядок такого перехода.

Для разработки перечней НДТ прежде всего необходимо определить виды деятельности, для которых необходимо установление НДТ, и провести систематизацию технологий и технологических процессов, типовых для каждой отрасли промышленности. Данную работу должны проводить не только заинтересованные

органы государственной власти, но также и представители промышленности, научно-исследовательских институтов, конструкторские бюро и эксперты. В результате перечень видов производственной деятельности, в отношении технологических процессов которых будет устанавливаться НДТ, должен быть включен в постановление Правительства РФ о порядке формирования и ведения перечней НДТ.

Формирование и ведение Перечня НДТ должно осуществляться организацией – администратором Перечня НДТ, назначаемой Правительством РФ в установленном порядке. Собственно сам Перечень НДТ должен состоять из программно-аппаратного комплекса и информационного ресурса. В свою очередь, информационный ресурс Перечня НДТ – из общедоступного сайта Перечня НДТ, находящегося в открытой сети интернет, и электронной базы данных (Ребрик И.И., 2009).

### **1.3. Опыт применения НДТ в биомониторинге состояния окружающей среды и обеспечении экологической безопасности**

#### **1.3.1. Европейский опыт**

Термин «наилучшие доступные технологии» появился в законодательных актах Великобритании еще в середине XIX века. Он упоминался в законах, датированных 1848, 1861 и 1874 годами (Leeds Act, Salmon Fishery Act, Alkali Act). В более поздних документах появлялись различные термины, близкие по смыслу к НДТ, например, «разумно достижимые» или «наилучшие используемые» технологии.

НДТ широко используются в Европейском союзе (ЕС), рекомендованы к использованию Организацией экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) и упоминаются в законодательных актах многих стран. Для Российской Федерации в предпочтении – использование европейского опыта нормирования воздействия на окружающую среду на основе НДТ (Лукин В., Головкин А., 2017).

Правовая система природоохранного законодательства, принятая Европейским Сообществом, является общепризнанной и наиболее совершенной. Эта система охватывает практически все основные вопросы охраны окружающей среды и природопользования.

Основным принципом природоохранного законодательства ЕС, предусмотренным Директивой 96/61/ЕС, в последней редакции 2008/1/ЕС от 15.01.2008 г. «О комплексном предотвращении и контроле загрязнений», является постоянное снижение степени воздействия на окружающую среду (Directive EC, 2008).

Целью комплексного подхода к контролю за загрязнением является предотвращение выбросов в атмосферу, почву и водную среду, либо сокращение таких выбросов.

Директива предусматривает применение механизма расчета показателей воздействия на основе «наилучших доступных технологий» (НДТ). Термин НДТ подразумевает, что такая технология является самой лучшей с точки зрения соблюдения экологических требований и доступной для лиц, заинтересованных в ее применении (Ребрик И.И., 2009).

Требование о применении НДТ распространяется на наиболее крупные отрасли экономики, эксплуатация предприятий которых существенно влияет на окружающую среду.

В целях защиты окружающей среды предприятия должны принимать все необходимые профилактические меры по предотвращению загрязнения, в частности, через применение НДТ, которые обеспечат им возможность повысить свою экологическую эффективность.

Для различных отраслей промышленности применяются разные перечни НДТ. Они содержатся в рекомендательных письмах, которые регулярно обновляются специально созданным для этих целей Европейским бюро с участием представителей профильных органов власти, отраслевых компаний, а также специалистов по охране окружающей среды. Справочные документы не предписывают использование какой-либо одной технологии. Диапазоны допустимых значений негативного воздействия на окружающую среду на основе НДТ для отдельных отраслей промышленности закреплены в специализированных справочниках НДТ (Лукин В., Головкин А., 2017). Справочники по НДТ широко используются в процедуре нормирования негативного воздействия, выдачи предприятиям разрешений на выбросы, сбросы, размещение отходов в странах ЕС. Подготовка справочников по НДТ – это непрерывный процесс, который включает в себя периодический пересмотр и обновление справочных данных.

Справочники по НДТ являются основой как для субъектов предпринимательской деятельности при выборе технологий, так и для государственных органов, полномочиями которых предусмотрена выдача комплексного разрешения на все виды воздействия (выбросы, сбросы, отходы).

Как показывает анализ европейского опыта использования НДТ в государственной системе регулирования, переход к нормированию воздействия на окружающую среду на основе НДТ стимулирует модернизацию производства и

внедрение экономически обоснованных методов производства, которые повышают конкурентоспособность и способствуют созданию имиджа экологически ответственного производителя.

В то же время для разработки комплексной стратегии перехода на НДТ необходим предварительный анализ административных, технических и финансовых рисков. Это диктуется дополнительными требованиями по соответствию критериям НДТ, а также процессами технической модернизации производства (Лукин В., Головкин А., 2017).

Применение НДТ в европейской терминологии означает не только предписание использования экологически благоприятного технического решения для производства конкретной продукции, но и рекомендует некоторые шаги по организации системы экологического менеджмента – неотъемлемой части общей системы управления (Ребрик И.И., 2009). Внедрение системы экологического менеджмента позволит оптимизировать комплекс мер, которые в целом могут предупредить и даже снизить негативное воздействие производственного процесса на окружающую среду.

Зарубежный подход к методологии внедрения НДТ является более прогрессивным, так как он имеет комплексный характер и позволяет использовать методологию расчета и применения НДТ на основе экологически обоснованного и экономически оправданного выбора (<http://docs.cntd.ru>).

Практическое применение принципа НДТ в экологическом мониторинге за рубежом наглядно показало свою эффективность. Это основной инструмент регулирования техногенного воздействия на окружающую среду.

### **1.3.2. Российский опыт**

Как показывает российский опыт, отечественные природопользователи предприятия, продукция которых шла на экспорт, применяли технологические нормативы, основанные на использовании НДТ еще в начале 90-х годов.

Позже Постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 26.09.2002 г. № 50 был утвержден программный документ «Основные направления политики Санкт-Петербурга в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности на период с 2003 по 2007 год». Этим документом предусматривалось «...создание и ведение банков данных наилучших существующих технологий, основанных на последних достижениях науки и техники и имеющих установленный

срок практического применения с учетом экономических и социальных факторов» (Ребрик И.И., 2009).

Из текста Постановления также следует, что «основные направления политики Санкт-Петербурга в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности базируются на основных принципах <...> использования наилучших из существующих технологий с учетом экономических и социальных факторов для обеспечения снижения негативного воздействия на окружающую среду».

В 2004-2005 годах в РАО «Бумпром» была разработана отраслевая система технологического нормирования выбросов/сбросов и размещения отходов, основанная на внедрении наилучших технических средств с максимальным учетом российской действительности. Эта система должна была стать основой комплексного разрешения на выбросы/сбросы и размещение отходов, она отличалась сокращенным списком нормируемых загрязняющих веществ, в основном характерных для применяемой технологии и нормированных по количеству производимой продукции.

В 2006 году рядом предприятий целлюлозно-бумажной промышленности по согласованию с Министерством природных ресурсов и Ростехнадзором был выдвинут проект «Разработка и реализация системы технологического нормирования на основе стратегии устойчивого развития», но он так и остался на этапе согласований.

В результате неоднократного реформирования государственных органов управления в области охраны окружающей среды и отсутствия прямой заинтересованности органов исполнительной власти в поддержке предложений предприятий, до сих пор не реализован положительный опыт российских субъектов экономики.

#### **1.4. Проблема загрязнения водных экосистем Восточной части Финского залива**

##### **1.4.1. Особенности загрязнения Восточной части Финского залива очищенными сточными водами**

Санкт-Петербург – крупнейший мегаполис на берегах Балтийского моря. Водные объекты Санкт-Петербурга представлены восточной частью Балтийского моря – Финским заливом, рекой Невой, ее эстуарием, и ее притоками, естественными и искусственными водоемами, реками, каналами и болотами.

Всего в черте города и на административно подчиненных ему территориях протекают 64 реки, 48 каналов, 34 ручья общей протяженностью 282 км, в том числе

непосредственно в черте города – 40 рек, рукавов, протоков и каналов общей протяженностью 217,5 км (Крючихин Е.М., 2004).

Финский залив расположен в Восточной части Балтийского моря. Он характеризуется небольшой глубиной, в особенности мелководной является его восточная часть. Средняя глубина залива составляет 38 м при площади в 29 тыс. км<sup>2</sup>. В месте впадения в залив реки Невы стоит город Санкт-Петербург. Кроме российских городов-портов Выборга и Кронштадта, на берегу Финского залива находятся город Таллинн (Эстония) и города Хельсинки, Котка и Турку (Финляндия). Акваторию, находящуюся на востоке Финского залива, называют Невской губой. В настоящее время Невская губа и вся восточная часть Финского залива находятся под возросшим влиянием антропогенных факторов, которые оказывают большое влияние на качество воды в заливе. Эта территория представляет собой уникальную эстуарийно-прибрежную экосистему, имеющую большое экономическое и геополитическое значение не только для города Санкт-Петербурга, но и для всего северо-запада России (Бегак М.В. и др., 2010).

Основные проблемы экологической ситуации в Финском заливе связаны с загрязнением воды в результате сброса неочищенных или недостаточно очищенных промышленных, сельскохозяйственных и бытовых сточных вод, а также с высокой степенью заселенности прибрежной территории.

В последние годы Финский залив испытывает возрастающее техногенное воздействие. Главными его источниками являются промышленность и интенсивное судоходство. Менее заметные, однако, играющие большую роль в негативном воздействии на Финский залив, загрязнители – это сельскохозяйственные и сточные воды. Кроме того, достаточно новой и еще малоизученной проблемой можно назвать дноуглубительные работы.

Восточная часть Финского залива – это активно развивающийся район со значительным объемом перевозок различных категорий грузов. Грузооборот через расположенные здесь порты увеличивается стремительными темпами. В районе городов Приморска, Высоцка и Усть-Луги полномасштабно работают портовые комплексы. Общий годовой грузопоток через порты Балтийского бассейна составляет около 210 млн. тонн, из них только через Финский залив – более 190 млн. тонн (Шахвердов В.А., Шахвердова М.В., 2015). Именно акватория Финского залива является конечным бассейном стока, сюда попадает большинство поллютантов, приводящих к загрязнению объектов природной среды залива.

Источники загрязнения окружающей среды принято подразделять на природные и антропогенные. Основными видами загрязнения вод Финского залива являются:

- механическое – повышение содержания механических примесей, свойственных, как правило, поверхностным видам загрязнений;
- химическое – наличие в воде, в донных осадках и почвах органических и неорганических веществ токсического и нетоксического действия;
- бактериальное и биологическое – наличие в воде, в донных осадках и почвах различных патогенных микроорганизмов, мелких водорослей и грибов;
- радиоактивное – присутствие радиоактивных веществ в поверхностных или в подземных водах, в донных осадках и почвах;
- тепловое – выпуск в водоемы подогретых вод тепловых и атомных электростанций.

Источники загрязнения природного происхождения, как правило, не оказывают существенного влияния на загрязнение вод Финского залива.

Механическое загрязнение залива связано с размывом берегов в результате воздействия течений и волн. Кроме этого, негативное воздействие на Финский залив оказывает также строительство новых портов, предполагающее рост судоходства, наличие нефтеперевалочных терминалов, транспортировки нефтепродуктов, гидростроительства (в частности, возведение комплекса защитных сооружений (дамбы) и развитие намывных территории Морского фасада). Так за период с 2006 г. по 2008 г. степень загрязнения вод взвешенными веществами на значительной части Невской губы и восточной части Финского залива достигала 100 и более мг/л (Петров О.В., 2010). При этом шлейф взвеси распространялся на расстояние до 200 км. Все эти факторы могут привести к резкому увеличению рисков и экологической опасности загрязнения акваторий Залива.

Наибольшую опасность для восточной части Залива представляют загрязнения промышленного происхождения.

Химическое загрязнение природного происхождения частично связано с попаданием в морскую среду диктионемовых сланцев копорской свиты нижнего Ордовика, с повышенным содержанием урана, ванадия и других химических элементов. Кроме того, после отработки месторождений железомарганцевых конкреций наблюдаются процессы растворения конкреций и селективного выноса из них химических элементов (Шахвердов В.А., Шахвердова М.В., 2015).

Основным источником антропогенно обусловленного химического загрязнения вод Финского залива являются объекты инфраструктуры Санкт-Петербурга. Превышение ПДК по содержанию тяжелых металлов (меди, цинка, хрома, кобальта, никеля, кадмия, астата, ртути, свинца) характерно для природных вод в районах порта «Высоцк» (Саев Ю.Е., 1990), нефтяного терминала «Приморск», а также для реки Луга и сбросовых вод Ленинградской АЭС. Воды Балтийского моря характеризуются высоким содержанием фенолов. Аномальные концентрации фенолов установлены в районе очистных сооружений г. Выборга (9,5 ПДК), в Приморске (до 10,4 ПДК) и в реке Рощинке (8,0 ПДК) (Шахвердов В.А., Шахвердова М.В., 2015).

Бактериальное загрязнение вод залива связано с фекальными, больничными, хозяйственно-бытовыми стоками, а также с различными органическими загрязнениями. В воде, в которой присутствует большое количество органики, начинаются процессы размножения патогенных микроорганизмов, в результате чего может произойти заражение людей и сельскохозяйственных животных. Также бактериальное загрязнение сточных вод свойственно некоторым промышленным предприятиям, среди которых – кожевенные заводы, фабрики первичной обработки шерсти, меховые производства, предприятия микробиологической промышленности и другие, и выражается в аномальном значении коли-индекса.

Биологическое загрязнение напрямую зависит от поступления в акваторию фосфора и азота, что может способствовать аномальному развитию сине-зеленых водорослей, особенно в летний период с прогревом поверхностных вод. В районах южного берега Финского залива эти процессы протекают более активно.

Радиоактивное загрязнение береговой зоны и прилегающей к ней акватории связано с прохождением над частью территории «чернобыльского облака». Это районы Лужской губы, Нарвского залива, а также центральная часть Выборгского залива, где наблюдается повышенная активность  $Cs_{137}$ .

Тепловое загрязнение связано со сбросом вод контура охлаждения Ленинградской атомной электростанции в Копорскую губу (Шахвердов В.А., Шахвердова М.В., 2015).

2014 год был объявлен Евросоюзом как «Год Финского залива», по итогам мероприятий в рамках этого события (с 2012 по 2016 годы) было сделано следующее заключение: современный уровень биологического разнообразия экосистем Восточной части Финского залива в целом находится в нормальном состоянии. Но некоторые проблемные точки все же имеются: к ним, в частности, можно отнести зоны

дноуглубления перед строящимися терминалами в портах Усть-Луга, Приморск и Бронка.

При проведении дноуглубительных работ в воду поступает большое количество взвеси, которая является губительной для гидробионтов (рыб, планктона). Взвесь препятствует проникновению солнечных лучей, водные растения становятся неспособными вырабатывать кислород и погибают, и, как следствие, погибает вся морская фауна. Мелкая глинистая взвесь оседает на икре и личинках рыб и других животных, что препятствует развитию организмов. Взвесь также впитывает такие вещества как нефтепродукты и тяжелые металлы, что сказывается на увеличении содержания вредных веществ в складках дна Финского залива. В них оседает большая часть отходов, мусора и грязи, выносимых Невой.

Несмотря на то, что «Водоканал Санкт-Петербурга» заявляет об очищении 98,5% бытовых сточных вод, акватория Финского залива в черте города продолжает загрязняться из-за неудовлетворительной работы очистных сооружений Ленинградской области и несанкционированных сбросов неочищенных вод.

По данным ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» за октябрь 2016 года концентрации легкоокисляемых органических веществ выше установленного норматива наблюдались в пробах воды, взятых в черте Ленинградской области в реках Вуокса, Тихвинка, Черная, Волхов и др. В большинстве рек были превышены ПДК по меди и железу.

В реке Каменка и в притоках Невы также были выявлены сверхнормативные концентрации легкоокисляемых органических веществ. Наиболее высокие концентрации железа, а также цинка и меди, были зафиксированы в реке Охта.

#### **1.4.2. Мониторинг загрязнения восточной части Финского залива недостаточно очищенными сточными водами**

Задачами биологического мониторинга являются наблюдения (сбор информации) за состоянием окружающей среды, диагностика и прогнозирование ее состояния в будущем.

Термин «мониторинг» впервые появился в рекомендациях специальной комиссии СКОПЕ (научный комитет по проблемам окружающей среды) при ЮНЕСКО в 1971 году.

Экологический мониторинг (мониторинг окружающей среды) (от лат. monitor - тот, кто напоминает, предупреждает) - многоцелевая информационная система

долгосрочных наблюдений, а также оценки и прогноза состояния природной среды. Основная цель экологического мониторинга - предупреждения критических ситуаций, вредных или опасных для здоровья людей, благополучия других живых существ, их сообществ, природных и созданных человеком объектов.

Сама система мониторинга не включает деятельность по управлению качеством среды, а является источником информации необходимой для принятия экологически значимых решений.

Система экологического мониторинга накапливает, систематизирует и анализирует информацию: о состоянии окружающей среды; о причинах наблюдаемых и вероятных изменений состояния (т. е. об источниках и факторах воздействия); о допустимости изменений и нагрузок на среду в целом; о существующих резервах биосферы.

Основные процедуры системы мониторинга:

- выделение (определение) и обследование объекта наблюдения;
- оценка состояния объекта наблюдений;
- прогнозирование изменений состояния объекта наблюдения;
- представление информации в удобной для использования форме и доведение ее до потребителя.

Прогноз состояния биотической составляющей окружающей среды может осуществляться на основе биотестирования и биоиндикации (<https://ecology-education.ru>).

Биоиндикация — оценка качества природной среды по состоянию её биоты. Она подразумевает обнаружение, идентификацию и определение концентрации загрязняющих веществ в биотической составляющей на основе широкого использования организмов – индикаторов (от лат. *indicare* – указывать).

Наиболее удобными организмами для биоиндикации состояния окружающей среды являются рыбы, водные беспозвоночные, микроорганизмы, водоросли.

В биотестировании выделяют такие направления как биосигнализация, экотоксикологические тесты, тесты по оценке эвтрофикации и др. Основа методов биотестирования – эксперименты.

Для обеспечения безопасного пользования водными ресурсами используется биосигнализация. В автоматизированных измерительных системах для определения токсичности воды используются тест-организмы различной таксономической принадлежности, такие как одноклеточные зеленые водоросли, простейшие, членистоногие, мхи, высшие растения, рыбы и другие.

Налаженная широкомасштабная и эффективная сеть контроля состояния окружающей среды, особенно в крупных городах и вокруг экологически опасных объектов, является важным элементом обеспечения экологической безопасности и залогом устойчивого развития общества.

Как уже было отмечено выше, основное влияние на состояние Финского залива оказывает загрязнение его вод посредством сброса неочищенных или недостаточно очищенных промышленных, сельскохозяйственных и бытовых сточных вод, а также высокая урбанизированность прибрежной территории.

Промышленные сточные воды, не прошедшие должную очистку, загрязняют как пресные водоемы, так и водоемы с соленой водой. И загрязняющие вещества, попавшие в эти водоемы, способны нанести большой вред как организмам и растительности, в них обитающим, так и человеку.

Контроль загрязнения вод и состояния биоты Финского залива необходим для оценки состояния экосистемы в условиях антропогенных воздействий. Без научно обоснованного подхода к освоению прибрежных акваторий может быть нанесен невосполнимый ущерб биоресурсам. Важную роль в получении научно-обоснованных оценок влияния природных факторов и различных видов антропогенных воздействий на водные экосистемы в целях сохранения их функциональной целостности выполняет мониторинг (Бегак М.В. и др., 2010).

С этой целью созданы Станции экологического мониторинга, которые могут располагаться в крупных населенных пунктах, а также в промышленных и сельскохозяйственных районах.

Кроме того, различают мониторинг: биоэкологический (санитарно-гигиенический), геоэкологический (природно-хозяйственный), биосферный (глобальный), космический, геофизический, климатический, биологический, здоровья населения, социальный и др. (<https://ecology-education.ru>).

Водный мониторинг проводится в рамках Государственного Водного Кадастра. Учет водных ресурсов (кроме подземных) и наблюдение за их режимом проводится в гидрометеорологических обсерваториях, станциях и постах Росгидромета. Роскомвод обеспечивает на предприятиях, в организациях и учреждениях контроль правильности учета количества вод, забранных из водоисточников, и сброса в них использованных вод. Государственный учет подземных вод (в том числе и эксплуатационных запасов) осуществляется организациями Министерства охраны природных ресурсов Российской Федерации. Контролю подлежат отбираемые питьевые и технические воды.

В настоящее время недостатком совместных исследований в рамках международного сотрудничества стран Балтийского региона является разрозненность работ по мониторингу, отсутствие единой базы данных и, следовательно, сопоставимости полученных результатов исследований.

А это, в свою очередь, приводит к разной оценке состояния акватории. Таким образом, особую актуальность приобретает задача создания единой современной системы комплексного мониторинга, которая будет обеспечивать межуровневое информационное взаимодействие различных источников данных, систем обработки и представления эколого-аналитической информации (Бегак М.В. и др., 2010).

Для комплексного анализа экологических ситуаций большое значение имеет возможность взаимосвязи различных данных друг с другом, их сравнение и анализ. Созданные на основе таких данных таблицы, карты и схемы позволяют наглядно просматривать и анализировать результаты полученных исследований.

Для этих целей наиболее подходят современные ГИС-технологии с возможностью сбора, интеграции и анализа любых распределенных в пространстве или привязанных к конкретному месту данных (Аляутдинов А.Р. и др., 2016).

Геоинформационная система экологической оценки и пространственного анализа базируется:

- на топографической основе, имеющей единую систему координат;
- на базах данных как хранителях информации об анализируемых объектах, имеющих единую организацию и структуру;
- на наборе программных модулей для получения оценок по ранее разработанным алгоритмам (Бескид П.П. и др., 2010).

В экологическом мониторинге используются различные методы исследования. Среди них можно выделить дистанционные (аэрокосмические) и наземные методы. К дистанционным методам относится, например, зондирование с искусственных спутников, космических кораблей. К наземным методам относятся биологические (биоиндикационные) и физико-химические методы.

Одной из основных составляющих мониторинга окружающей природной среды является биологический мониторинг, под которым понимают систему длительных наблюдений, оценки и прогноза любых изменений в биоте (наличие и исчезновение каких-либо видов, изменение их состояния и численности, появление случайных интродуцентов, изменение ареала и др.), вызванных факторами антропогенного происхождения.

На основе данных биологического мониторинга водных ресурсов можно разработать план мероприятий, направленных на улучшение состояния речных экосистем. Очень важно организовать мониторинговые наблюдения на потенциально опасных территориях, где существует вероятность сбоя технологического процесса и появления залповых высокотоксичных стоков (Павлюк Т.Е., 2015).

Структура биологического мониторинга является довольно сложной. Биологический мониторинг состоит из отдельных подпрограмм исходя из принципа, основанного на уровнях организации биологических систем. Так, генетический мониторинг соответствует субклеточному уровню организации, а экологический мониторинг – популяционному и биоценолотическому уровням.

### **1.5. Понятие, сущность и методы биоиндикации загрязнений водных экосистем**

Биоиндикация (bioindication) — обнаружение и определение экологически значимых природных и антропогенных нагрузок на основе реакций на них живых организмов непосредственно в среде их обитания (Мелехова О.П. и др., 2008).

Другими словами: биоиндикация – система оценки качества природной среды по состоянию ее биоты.

Биоиндикация может быть осуществлена на всех уровнях организации живого: биологических макромолекул, клеток, тканей и органов, организмов, популяций и сообществ.

К критериям выбора биоиндикаторов относятся: быстрый ответ, надежность (ошибка менее 20%), простота и постоянное присутствие в природе данного живого объекта.

Основной задачей биоиндикации является разработка методов и критериев, которые могли бы адекватно отражать уровень антропогенных воздействий с учетом комплексного характера загрязнения и диагностировать ранние нарушения в наиболее чувствительных компонентах биотических сообществ. Биоиндикация, как и мониторинг, осуществляется на различных уровнях организации биосферы: макромолекулы, клетки, органа, организма, популяции, биоценоза. Сложность живой материи и характера ее взаимодействия с внешними факторами возрастает по мере повышения уровня организации. В этом процессе биоиндикация на низших уровнях организации должна диалектически включаться в биоиндикацию на более высоких уровнях, где она предстает в новом качестве и может служить для объяснения динамики более высокоорганизованной системы (Ашихмина Т.Я., 2005).

Каждая группа организмов, которую можно использовать в качестве биологического индикатора имеет свои преимущества и недостатки, которые определяют границы ее использования при решении задач биоиндикации.

Преимущества животных-индикаторов состояния окружающей среды:

- они суммируют все без исключения биологически значимые для живых организмов изменения качества окружающей среды;

- не исключают применение дорогостоящих и трудоемких физических и химических методов измерения биологических показателей качества вод, которые не всегда могут зарегистрировать кратковременные и залповые выбросы токсикантов, но могут иметь alarm-значение;

- указывают пути и места скопления различного рода загрязнений в экологических системах и возможные пути попадания этих агентов в пищу;

- позволяют судить о степени вредности тех или иных веществ для природы, животных и человека;

- дают возможность оценивать действие многих новых синтезируемых человеком соединений («emerging agents»);

- способствуют прогнозированию дальнейшего развития экосистемы нагрузки на экосистемы.

Различные виды живых существ могут проявлять различную чувствительность к видам и уровням загрязнения окружающей среды.

Так, например, водоросли играют ведущую роль в индикации изменения качества воды в результате я водоема.

Бурное развитие сине-зеленых водорослей является хорошим индикатором опасного загрязнения воды органическими соединениями.

Лучший индикатор опасных загрязнений – прибрежное обрастание, располагающиеся на поверхностных предметах у кромки воды. В чистых водоемах эти обрастания ярко-зеленого цвета или имеют буроватый оттенок. Для загрязненных водоемов характерны белые хлопьевидные образования. При избытке в воде органических веществ и повышения общей минерализации обрастания приобретают сине-зеленый цвет, так как состоят в основном из сине-зеленых водорослей. При плохой очистке фекально-бытовых сточных вод обрастания бывают белыми или сероватыми. Как правило, они состоят из прикрепленных инфузорий (*Vorticella*, *Carchesium polypinum* и др.). Стоки с избытками сернистых соединений могут сопровождаться хлопьевидными налетами нитчатых серобактерий-теотриков (Петин А.Н. и др., 2006).

Зоопланктон является хорошим индикатором эвтрофирования и загрязнения (в частности органического и нитратного) вод. Кроме этого, среди зоопланктона встречаются и представители патогенной фауны, ограничивающей использование водного объекта в целях водоснабжения.

Простейшие являются высокочувствительными индикаторами сапробного состояния водоемов.

Зообентос служит хорошим индикатором загрязнения донных отложений и придонного слоя воды. К наиболее достоверным индикаторам относятся легочные моллюски, особенно катушки и речные чашечки. Положительные результаты дает также оценка качества воды по личинкам насекомых. Свободно живущие личинки ручейников, а также поденок являются наиболее чувствительными организмами.

Проведение биологических исследований имеет свои особенности в стоячих и текущих водоемах.

Для изучения рек и ручьев большое значение имеют перифитонные организмы (т.е. обрастатели), которые дают картину общего состояния воды за достаточно длительный промежуток времени, предшествующий исследованию. Быстрые колебания степени загрязнения воды плохо уловимы с помощью перифитона и для их наблюдения лучше подходят гидрохимические и бактериологические методы.

Биологическое исследование стоячих водоемов, как правило, интерпретируется более легко. Для этого, прежде всего, необходимо провести комплекс исследований, чтобы иметь более полное представление о состоянии водоема.

Чем крупнее исследуемый водоем, тем большее количество разнообразных станций надо выбирать по его периметру.

Биоиндикация позволяет оценить качество вод природных водоемов (или зоны загрязнения) по состоянию индикаторных видов или сообществ организмов. Этот подход рекомендован для применения в системах государственных служб по гидрометеорологии и контролю окружающей среды не только в странах ЕС, но и в России.

Таким образом, биологические методы оценки состояния водоемов и водотоков позволяют решать задачи, которые невозможно разрешить с помощью только гидрофизических и гидрохимических методов.

Кроме того, определение качества воды и состояния водных экологических систем по совокупности гидробиологических показателей оказывается гораздо дешевле и порой проще, чем оценка по гидрохимическим показателям (<https://studwood.ru>).

## **1.6. Системы раннего биологического предупреждения**

Повышенное внимание к использованию предприятиями наилучших доступных технологий явилось предпосылкой к появлению информационно-измерительных систем (ИИС), которые могли бы контролировать эффективность использования таких технологий, их роль в обеспечении экологической безопасности природных объектов.

Биоэлектронная система контроля безопасности биологически очищенных сточных вод может быть использована в качестве информационной основы для автоматической системы предоставления информации населению и государственным службам о безопасности сточных вод.

Так как эта биоэлектронная система предусматривает использование биологических индикаторов, то становится возможным анализировать и контролировать не только влияние изменений концентраций конкретных загрязняющих веществ на выбранные организмы-биоиндикаторы, но и учитывать синергизм действия многих факторов, изменяющих качество воды как среды обитания гидробионтов. По реакциям живых организмов можно судить об изменениях химических характеристик водной среды (Мельник Е.А. и др., 2013).

Таким образом, с помощью таких ИИС возможно осуществление контроля деятельности предприятий в рамках НДТ.

С помощью систем раннего биологического предупреждения можно определить уровень загрязнения водной среды, прилегающей к месту нахождения предприятия. При превышении предприятиями норм предельно допустимых выбросов (концентраций вредных веществ) происходят изменения физиологического состояния животных-биоиндикаторов, населяющих данную акваторию. Кроме того, реакция биологических организмов на комплексы загрязняющих веществ позволяет объективно оценить возможные последствия такого загрязнения.

### **1.6.1. Современные системы раннего биологического предупреждения (СРБП) об опасном для гидробионтов изменении качества водной среды**

В настоящее время антропогенному воздействию подвержены практически все экосистемы Земли. Однако наиболее ярко оно выражено по отношению к водным экосистемам. Зачастую это воздействие влечет за собой негативные изменения в их структуре, а также отражается на численности и разнообразии населяющей их биоты.

Состояние воды ухудшается вследствие подкисления и присутствия азота и фосфора, тяжелых металлов, органических токсинов и пестицидов (Bloxham et. al., 1999).

С течением времени человечество стало осознавать необходимость регулирования и минимизации негативных воздействий на окружающую среду с целью сохранения природных ресурсов и биологического разнообразия для будущих поколений.

Так были разработаны методы оценки качества воды, особое место среди которых занимают физико-химические и биологические. Каждый из упомянутых методов имеет определенные преимущества и недостатки, однако, используя их в комплексе, можно достичь наивысшей точности в определении воздействия на водные объекты, своевременно выявить проблемы и принять необходимые меры для их устранения.

Таким образом, на основе долгосрочных автоматических наблюдений, основанных на способности водных организмов реагировать на загрязнители, были разработаны различные биотесты. Кроме этого, были разработаны системы раннего биологического предупреждения (СРБП) об опасном уровне загрязнения водной среды.

Действие таких систем основано на диагностике функционального состояния представителей биоты в конкретной экосистеме, которая уже подверглась негативному воздействию природного или антропогенного характера.

Для широкого использования в системе мониторинга безопасности и качества водоснабжения СРБП должны иметь следующие характеристики (<https://nepis.epa.gov>).

- оперативность, быстрота отклика;
- способность обнаруживать широкий диапазон потенциальных загрязнителей;
- высокая степень автоматизации, в том числе автоматическое сохранение проб воды;
- доступная цена и доступная стоимость обслуживания и модернизации;
- простота в использовании;
- способность идентифицировать источник загрязнения и точно определять местоположение и концентрации загрязняющих веществ ниже по течению от пункта наблюдения;
- достаточная чувствительность для определения загрязняющих веществ;
- минимальная вероятность ложного срабатывания;
- прочность и надежность при непрерывном использовании в водной среде;
- дистанционность управления;
- непрерывность функционирования;

- доступность для тестирования и оценки третьими лицами.

И такая система, удовлетворяющая большинству вышеперечисленных требований, была введена в 2005 году впервые в мировой практике на всех 11 водозаборах городских водопроводных станций в Санкт-Петербурге. Данная система была разработана и создана в лаборатории биоэлектронных методов геоэкологического мониторинга (прежнее название – лаборатория экспериментальной экологии водных систем) Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности РАН. В 1999 году в лаборатории был разработан лазерный волоконно-оптический фотоплетизмограф (ЛВОФ), а в 2003-2004 годах – программное обеспечение, позволяющее в режиме реального времени оценивать уровень стрессированности ракообразных (Холодкевич С.В. и др., 2011).

Кроме того, на Санкт-Петербургском Водоканале работают еще несколько систем биомониторинга качества воды, в частности, на водозаборе Главной водопроводной станции ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» установлена Система производственного биологического мониторинга качества воды (СПБМКВ). В 2010 г. биоэлектронная система СПБМКВ была введена в производственную эксплуатацию на одной из крупных городских станций аэрации Санкт-Петербурга для контроля качества очищенной сточной воды, сбрасываемой в Невскую губу – водоем рыбохозяйственного назначения 1-й категории.

На основе совместной разработки Научно-исследовательского центра экологической безопасности и ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» на всех водопроводных станциях (ВС) Санкт-Петербурга с 2006 г. действует Система обеспечения безопасности водоснабжения в условиях обнаружения токсичных веществ в воде водозаборных сооружений, которая обеспечивает:

- своевременное обнаружение и индикацию токсичных веществ в воде водозаборных сооружений ВС («сырой» воде);
- принятие экстренных мер по организации безопасного водоснабжения населения в условиях обнаружения токсичных веществ в сырой воде;
- принятие мер по защите работников и очистных сооружений ВС от токсичных веществ (Холодкевич С.В. и др., 2011).

Юго-Западные очистные сооружения филиала «Водоотведение Санкт-Петербурга» ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» ежедневно сбрасывают около 330 тысяч кубометров биологически очищенных сточных вод в Невскую губу – водоем рыбохозяйственного назначения 1-ой категории. Это обстоятельство предъявляет

дополнительные требования к качеству очистки воды, а также к методам мониторинга и самоконтроля предприятия (Мельник Е.А. и др., 2013).

В цехе УФ-обработки биологически очищенных сточных вод ЮЗОС установлена автоматическая станция непрерывного экологического мониторинга качества воды АСНЭМ-3. Данная станция используется для оперативного контроля питьевой воды, качества воды в природных водоемах, а также для раннего предупреждения служб водоснабжения населенных пунктов об изменениях качества воды в зоне водозабора.

В режиме реального времени АСНЭМ-3 передает информацию о качестве воды в аквариумах с тест-организмами в диспетчерскую службу. С помощью этой станции происходит регистрация таких показателей, как температура воды, ее электропроводность, акустический шум и вибрация, рН воды, мутность и оптическая плотность воды на длине волны 24 нм, а также концентрации аммонийного азота, нитрат-ионов и хлорид-ионов.

Функциональное назначение станции АСНЭМ-3 заключается в автоматическом поиске причин ложного срабатывания станции производственного биомониторинга качества сточных вод. (Панкова Г.А. и др., 2013). Ложное срабатывание может возникнуть в результате быстрого изменения качественных показателей биологически очищенных сточных вод или в связи с возникновением неполадок в работе системы станции биомониторинга (например, повышается температура в аквариуме вследствие загрязнения канала регистрации или у животных-биоиндикаторов развивается стресс из-за повышенного шума и вибрации). При поступлении сигнала тревоги, например, от биологической системы с раками, используемыми в качестве тест-организмов, делается отбор проб воды. Анализируется динамика изменения кардиоактивности раков, а также изменения температур воды, воздуха и интенсивности шума.

Опыт производственной эксплуатации данной системы непрерывного контроля в реальном времени токсикологической безопасности биологически очищенных сточных вод, сбрасываемых ЮЗОС в Невскую губу, показал, что за весь период ее применения не было зарегистрировано высокой токсичности сточных вод и воздействия токсикантов на применяемые тест-организмы (Панкова Г.А. и др., 2013).

Системы мониторинга в режиме реального времени в настоящее время применяются в большинстве стран. Это позволяет обеспечивать информационную поддержку принятия управленческих решений, направленных на минимизацию природных и техногенных рисков. Как показывает отечественный и зарубежный опыт, для обоснования принятия управленческих решений по обеспечению экологической

безопасности водных экосистем вполне достаточно анализа изменения таких интегральных характеристик воды, как содержание растворенных органических веществ (РОВ), мутность (содержание взвешенных веществ), химическое потребление кислорода (ХПК), pH, окислительно-восстановительный потенциал, концентрация кислорода, удельная теплопроводность и температура (Холодкевич С.В., 2002).

Однако диапазон изменений качества поверхностных вод, обусловленный только природными факторами, может быть достаточно широким по величине и стохастическим по времени. Существующие системы на основе датчиков измерения физико-химических характеристик поверхностных вод предусмотрены только для мониторинга конкретных характеристик воды и не позволяют выявить другие вредные воздействия на воду, которые могут оказаться довольно опасными. Кроме того, они не дают возможность объективно определять степень опасности этих изменений для гидробионтов. Поэтому для каждой конкретной акватории принципиально важно использовать в качестве биоиндикаторов аборигенных представителей фауны, так как только они способны выполнять функцию экологической «мишени» для интегральной оценки опасности загрязнения поверхностных вод. Именно в этом и состоит преимущество системы мониторинга токсичности поверхностных вод на основе регистрации и анализа кардиоактивности ракообразных.

### **1.6.2. Очистные сооружения г. Санкт-Петербурга, технологии и методы очистки сточных вод**

Среди городов Российской Федерации Санкт-Петербург занимает 2-е место по объему сброса сточных вод в водные объекты, на его долю приходится 6% общероссийского объема сброса сточных вод.

Основным загрязнителем является жилищно-коммунальное хозяйство, с очистных сооружений которого сбрасывается 1115,15 млн. м<sup>3</sup>, или 90% городского объема стоков.

В настоящее время в Санкт-Петербурге имеется 3 крупных очистных комплекса и 4 небольшие локальные очистные станции в районе Парголово. Здесь производится очистка более 2,2 млн. м<sup>3</sup> сточных вод в сутки, что составляет около 75% от всего количества сточных вод, поступающих в систему коммунальной канализации города (Крючихин Е.М., 2004.)

В пригородах Санкт-Петербурга (Кронштадт, Сестрорецк, Зеленогорск, Колпино, Петродворец, Пушкин и др.) действует 12 комплексов очистных сооружений, обрабатывающих 93% всех стоков.

Для улучшения качества воды, а также для выполнения международных требований к составу сбрасываемых в акваторию Финского залива очищенных сточных вод ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» осуществляет долгосрочную программу по развитию канализации Санкт-Петербурга.

В октябре 2013 года завершилось строительство Главного канализационного коллектора северной части города, благодаря этому было закрыто 76 прямых выпусков сточных вод. Это позволило прекратить сброс в Неву сточных вод объемом 334 тыс. м<sup>3</sup> в сутки. В 2014 году закрыты еще более двух десятков прямых выпусков на Петроградской набережной и в районе стадиона «Петровский». В 2015 году закончено строительство канализационного коллектора под Адмиралтейской набережной (закрыты еще 6 прямых выпусков сточных вод в центре города). В июне 2015 года была проложена канализационная сеть на площади Репина. Теперь сточные воды направляются на Центральную станцию аэрации для очистки. В 2016 году были проведены работы по переключению 15 прямых выпусков сточных вод в Адмиралтейском, Петроградском, Приморском, Красногвардейском и Красносельском районах с общим расходом более 366 м<sup>3</sup> в сутки (<http://www.vodokanal.spb.ru>). В настоящее время в Санкт-Петербурге очищается 98,6% всех стоков.

Кроме этого, ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» уделяет особое внимание качеству очистки сточных вод. Предприятие руководствуется не только российскими нормативами, но и рекомендациями Хельсинкской комиссии по защите Балтийского моря, которые касаются содержания в сбрасываемых водах фосфора и азота. В результате усовершенствования методов очистки сточных вод в Санкт-Петербурге значительно снизился сброс по органическим веществам и азоту при одновременном существенном сокращении энергозатрат. В настоящее время содержание фосфора в сбрасываемых сточных водах не превышает 0,5 мг/л, азота – 10 мг/л. Еще один уровень очистки сточных вод – это обеззараживание очищенных стоков ультрафиолетовым облучением. В настоящее время данная технология применяется на Юго-Западных очистных сооружениях, а также на очистных сооружениях Сестрорецка, Репина и Петродворца (<http://www.vodokanal.spb.ru>).

Постоянная работа по реконструкции существующих и строительству новых сооружений способствует достижению стабильных показателей по снижению содержания вредных веществ в воде Санкт-Петербурга.

За период 2012-2017 г.г. было реконструировано восемь первичных отстойников, построены две новые насосные станции сырого осадка, внедрена технология преферментации сырого осадка, построена новая насосная станция возвратного и избыточного ила, реконструированы пять секций одного аэротенка с внедрением технологии глубокого удаления азота и фосфора, а также реконструированы шесть вторичных отстойников (<http://www.vodokanal.spb.ru>). Средняя производительность Северной станции аэрации после двух этапов реконструкции (1-й этап реконструкции завершен в 2017 году) составит 1 млн. м<sup>3</sup> в сутки. Это позволит обеспечить эффективность очистки стоков, необходимую для соблюдения требований законодательства РФ и рекомендаций ХЕЛКОМ.

В конце 2013 года правительство Санкт-Петербурга приняло Схему водоснабжения и водоотведения города на период до 2025 года, которая была актуализирована в 2015 году. В соответствии с этой Схемой к 2020 году будет полностью прекращен сброс неочищенных хозяйственно-бытовых, общесплавных сточных вод в водные объекты города.

Одним из важнейших объектов канализационной системы и самым современным комплексом по очистке стоков являются Юго-Западные очистные сооружения Санкт-Петербурга (ЮЗОС). Производительность ЮЗОС – 330 тыс. км<sup>3</sup> воды в сутки. В 2007 году на Юго-Западных очистных сооружениях был введен в эксплуатацию завод по сжиганию осадка сточных вод (<http://www.vodokanal.spb.ru>).

Кроме утилизации осадка сточных вод завод еще и вырабатывает электроэнергию и тепло, что дает возможность Водоканалу снижать потребности в покупных энергоресурсах. С 2011 года здесь стала применяться уникальная система биомониторинга состава дымовых газов с использованием улиток. Улитки дышат воздухом с примесью дыма, выходящего из трубы завода. К раковинам улиток прикрепляются оптоволоконные датчики сердцебиения и поведения (двигательной активности), благодаря которым функциональное состояние животных оценивается в автоматическом режиме с помощью специального программного обеспечения. Эта система является самой современной и полностью удовлетворяет требованиям российских нормативных документов, а также Директиве Европейской комиссии, регламентирующей условия сжигания и требования к выбросам загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Кроме улиток, в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» используются и другие животные-биоиндикаторы: речные и австралийские раки, а системы биомониторинга, применяемые в Водоканале, разработаны учеными Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности Российской академии наук (НИЦЭБ РАН).

Таким образом, благодаря применению новых эффективных методов и систем очистки сточных вод ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» вносит большой вклад в обеспечение экологической безопасности региона (Крючихин Е.М., 2004.).

Выбор предприятием эффективной технологии очистки сточных вод – это баланс между разумной экономией, эффективной очисткой и соблюдением экологических нормативов (<http://stroypuls.ru>).

Технология очистки применяется на предприятии в зависимости от того, какие сточные воды необходимо очистить. Так, например, хозяйственно-бытовые воды проходят механическую и биологическую очистку, а ливневые сточные воды – чаще всего механическую очистку.

Наиболее актуальной проблемой для мегаполиса является очистка нефтесодержащих стоков. Очистка таких сточных вод возможна только при реализации многоступенчатых технологических схем извлечения нефтепродуктов и других загрязняющих веществ

Примером таких очистных сооружений являются сооружения Морского порта.

Существенные изменения в области очистки промышленных стоков возможны в связи с переходом к концепции наилучших доступных технологий (НДТ). Суть ее заключается в использовании эффективных и экономически оправданных разработок для установления разрешений на эмиссии загрязняющих веществ в окружающую среду (Коваценко М., 2017).

К объектам, обязанным внедрять НДТ, относятся производители огнеупорных и строительных керамических изделий и материалов, синтетических красителей, неорганических красок и лаков, лекарственных препаратов, поверхностно-активных веществ, а также предприятия ТЭК, полигоны ТКО и объекты, на которых используются химические или электротехнические процессы.

## **ГЛАВА 2. ОБЗОР БИОЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОДОВ И СИСТЕМ БИОТЕСТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОРГАНИЗМОВ-БИОИНДИКАТОРОВ**

Системы раннего биологического предупреждения предназначены для выявления чрезвычайных и нештатных экологических ситуаций: техногенные аварии и катастрофы, несанкционированные залповые сбросы неочищенных сточных вод или дымовых газов и др. Такие системы позволяют выявить возможные негативные последствия загрязнений еще до наступления серьезных изменений в экосистемах.

Наиболее эффективной считается система оценки состояния экосистем, проводимая на основе наблюдения за функциональным состоянием обитающих в этих экосистемах животных. Но для такой технологии необходимо подобрать адекватные виды биоиндикаторов для использования их в биоэлектронных системах в качестве тест-организмов. Кроме того, для получения достоверных оценок функционального состояния выбранных тест-организмов должны быть разработаны стандартизированные тест-воздействия и выбраны временные точки такого тестирования для конкретного типа водоема.

### **2.1. Системы MosselMonitor и DreissenaMonitor как системы раннего биологического предупреждения и контроля состояния окружающей среды**

В некоторых зарубежных странах функционируют системы раннего биологического предупреждения об опасном уровне загрязнения водной среды путем регистрации величины раскрытия створок (ВРС) двустворчатых моллюсков. Эти системы были разработаны в Голландии в 1990-е годы: для мониторинга состояния морской воды – система MosselMonitor, для пресной – DreissenaMonitor (Холодкевич С.В. и др., 2011).

Система MosselMonitor – это биологическая система раннего предупреждения для непрерывного оперативного мониторинга морской воды, поверхностных вод, сточных вод, водозаборов. В случае загрязнения она может сигнализировать без внешнего контроля и без обширной системы анализа. Работа данной системы основана на наблюдении за поведением мидий. Суть этой системы сводится к тому, что в чистой воде створки мидий остаются открытыми большую часть времени и закрываются лишь на короткие периоды. В загрязненной же воде мидии ведут себя по-разному. Поведение

мидий зависит от типа и уровня загрязнения. Таким образом, используя систему распознавания образов движения мидий, можно контролировать качество воды.

Датчиком в системе MosselMonitor является сама мидия. Возможно использование как пресноводных, так и морских мидий, например, мидии-зебры (*Dreissena polymorpha*) или голубой мидии (*Mytilus edulis*) и др.

Кроме химических загрязнителей воды на поведение мидий могут оказывать влияние и другие факторы, (например, температура воды, мутность, значение pH и др.), поэтому в MosselMonitor включена система измерения температуры, мутности, pH и др.

## **2.2. Microtox – система мониторинга токсичности водной среды**

Microtox является тестовой системой, использующей биoluminesцентные бактерии для обнаружения токсичности в воде. Она применяется для тестирования образцов, содержащих биологические токсины, промышленные стоки, токсикологические пробы питьевой воды, опасные отходы, ливневую воду, промышленные технологические воды на биологическую реактивность. Результаты тестирования доступны уже через 15 минут, а сами тесты экономичны и просты в выполнении.

Тест на острую токсичность Microtox используется для мониторинга питьевой воды во многих странах и крупных городах, где возможно случайное или преднамеренное загрязнение.

Для определения токсичности используется штамм встречающихся в природе люминесцентных бактерий *Vibrio fischeri*, которые излучают свет как естественную часть своего метаболизма. При воздействии токсичных веществ происходит нарушение дыхательного процесса бактерий, что приводит к снижению светоотдачи. Снижение светоотдачи и является мерой токсичности тестируемого образца.

Биосенсор Microtox реагирует на токсические соединения самой разнообразной химической природы, т.е. характеризуется широким спектром анализируемых веществ и внешних факторов. Он используется в первичном скрининге на токсичность воды, воздуха, а также пищевых продуктов, различных изделий и материалов. В том случае, если биосенсор определил токсичность, проводят дальнейшее исследование с помощью других физико-химических методов, для того чтобы определить природу загрязняющего вещества.

Токсикологические исследования с применением системы Microtox установили, что в некоторых материалах и изделиях (например, упаковках пищевых продуктов,

детских игрушках, различных медицинских приспособлениях и др.) могут содержаться различные химические вещества, которые при взаимодействии с телом человека могут вызывать тот или иной токсический эффект. К таким веществам относятся, например, красители и стабилизаторы, а также пластификаторы и т.п.

Большинство веществ в составе промышленных и бытовых стоков способны оказывать токсическое воздействие на микроводоросли, поэтому водорослевые биотесты применяются при нормировании качества вод (Жмур Н.С., Орлова Т.Л., 2004).

Для биотестирования наиболее часто в качестве тест-культуры используются водоросли в связи с доступностью условий их культивирования, высокой воспроизводимостью. Лабораторная культура микроводорослей для биотестов выращивается на питательных средах со специально подобранным составом компонентов.

Для оценки токсичности пресных вод возможно использование пресноводных видов водорослей (*Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb. и *Chlorella vulgaris* Beijer).

Для биотестирования высокоминерализованных сред применяются культуры морских микроводорослей (*Phaeodactylum tricornutum* Bohlin и *Thalassiosira weissflogii*).

Токсическое воздействие вредных веществ на водоросли можно определить по ряду признаков: побурение или осветление суспензии микроводорослей, изменение рН среды в культуре, определение соотношения живых и мертвых клеток водорослей методом люминесцентной микроскопии, определение содержания фотосинтетических пигментов (хлорофиллов, каротиноидов) и др. Преимущества использования фотосинтеза водорослей в качестве тест-функции связано с высокой чувствительностью ко многим загрязнениям.

Использование водорослей возможно при оценке токсичности питьевых, природных и сточных вод, а также осадков сточных вод и отходов производства и потребления.

Но в настоящее время в России многие из методик биотестирования не обеспечены комплексом аппаратуры, которые позволили бы создать стандартные условия работы с тест-организмами и автоматизировать измерительный процесс, что в свою очередь затрудняет получение воспроизводимых результатов экспериментов.

На базе Сибирского федерального университета (СФУ) в г. Красноярске были разработаны новые оперативные методы и аппаратура для биотестирования, где в качестве тест-организмов предполагается использование культур водорослей

(*Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb. и *Chlorella vulgaris* Beijer), а также рачков (*Daphnia magna* Straus и *Ceriodaphnia affinis*). Для наращивания тест-культуры водоросли был создан компактный культиватор КВМ-05, позволяющий увеличивать численность клеток при поддерживаемой температуре на уровне 36°C. Культура водоросли, выращенная при 36°C и внесенная затем в тестируемые пробы воды, при 25°C дает прирост в таком культиваторе в 25-30 раз за 45 часов, в то же время чувствительность тест-культуры при проведении биотестирования при этих температурах является одинаковой (structure.sfu-kras.ru). Высокая чувствительность водоросли хлорелла к токсикантам достигается благодаря малой плотности засева тест-культуры. Это условие очень важно, так как результат зависит не только от концентрации поллютанта в среде, но и от соотношения численности или массы тест-организмов к количеству токсикантов в тестируемом объеме воды. Благодаря созданным условиям для быстрого роста тест-культуры водоросли ее начальная малая плотность не влияет на длительность проведения биотеста.

В приборе КВМ-05 снабжение растущих проб культуры углекислым газом обеспечивает наклонно установленная кассета с флаконами-реакторами, которую приводит во вращение двигатель. Благодаря вращению кассеты обеспечивается одинаковое для всех размещенных в ней флаконов-реакторов световое облучение, температура, скорость поступления углекислого газа и перемешивание. Поддержание нужной температуры обеспечивается вентилятором, а непрерывное световое облучение – лампой накаливания, установленной в приборе.

При проведении биотестирования токсичности вод в России уже давно используется в качестве тест-организма водоросль сценедесмус (*Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb.) (Жмур Н.С., Орлова Т.Л., 2004).

Однако биотест на его основе является достаточно трудоемким в выполнении и длительным по времени. Это во многом объясняется отсутствием серийно выпускаемого оборудования для его проведения, а также обеспеченностью тест-культур углекислым газом и активным перемешиванием.

Благодаря использованию специализированного оборудования для биотестирования, которое производится в России ООО «Европолитест», световые условия, необходимые для тест-культур, обеспечиваются климатостатами В3 и В4 (в которых режим работы программируется и сохраняется отдельно для каждого тест-организма), а достаточная концентрация кислорода достигается при помощи устройства УЭР-03, работающего в непрерывном режиме.

Для экспрессного выявления токсичности природных и сточных вод, а также отходов также применяется метод регистрации относительного показателя интенсивности замедленной флуоресценции (ОПЗФ) водоросли хлорелла (Григорьев Ю.С. и др., 2008). Этот показатель не зависит от количества тест-организмов и мутности тестируемой воды и может быть измерен в течение нескольких секунд. Для реализации этого метода был создан флуориметр Фотон-10, с помощью которого в автоматическом режиме можно одновременно проводить анализ токсичности до 24 образцов, при этом полученная информация отражается на компьютере.

Таким образом, при обеспечении методик биотестирования комплексом аппаратуры, необходимым для создания стандартных условий для работы с тест-организмами и обеспечивающим автоматизацию процесса измерения возможно получение более полной характеристики качества жидких сред.

### **2.3. Система биомониторинга с использованием рыб Fish-Toximeter**

Fish-Toximeter предназначен для выявления токсичных веществ в реках, водохранилищах, водозаборах, системах водоснабжения и канализационных очистных сооружениях.

Этот прибор позволяет наблюдать за поведением рыб в аквариуме под воздействием потока отобранной в качестве пробы воды с помощью камеры и непрерывного компьютерного анализа изображений.

Непрерывный анализ видеоизображений дает возможность быстро определить поведение и состояние здоровья рыбы. Оценки токсичности исследуемых проб воды основываются на измерении нижеследующих поведенческих параметров:

- скорость плавания;
- поведение рыб (повороты, круговые движения и т.д.);
- определение размера;
- количество активных рыб;
- расположение рыб в аквариуме.

Каждый тип изменений в поведении рыб анализируется, затем рассчитывается так называемый «токсический индекс», суммируемый по всем поведенческим параметрам. В том случае, если токсический индекс будет превышать определенное значение в течение определенного периода времени, сработает сигнал тревоги. Это

произойдет в том случае, если несколько поведенческих параметров покажут отклонения.

Впервые о необходимости создания системы эколого-биохимического мониторинга и тестирования водоемов по состоянию рыб заявил В.С. Сидоров на первом симпозиуме по экологической биохимии и физиологии рыб в 1987 году, а еще раньше, в 1979 году, проблему развития исследований по экологической биохимии гидробионтов обозначил академик Е.М. Кребс на биохимическом съезде. После этого на конференциях различного уровня было представлено множество научных докладов, так или иначе связанных с разработкой этой системы.

В целом эта система тестов позволяет оценить по некоторым параметрам несколько физиолого-биохимических функций в организме рыб: окислительный стресс, процессы деградации и биосинтеза биополимеров, состояние органов по проницаемости их биомембран и появлению в крови специфических для отдельных тканей и органов компонентов, детоксикационную способность печени и почек, генную регуляцию обмена веществ, общий адаптивный синдром, функционирование путей транспорта липидов, функционирование биомембран. Указанный выше перечень важнейших биохимических функций был получен в результате многолетней исследовательской работы. Одновременно с фундаментальными исследованиями решались и конкретные задачи, актуальные для определенного региона. Например, выявлялось загрязнение водоемов отходами целлюлозно-бумажного производства, паразитарные и алиментарные болезни выращиваемой на рыбоводных заводах и в прудовых хозяйствах рыбы, устанавливались ПДК некоторых веществ и др. Выяснилось, что реакция организма на многие неблагоприятные факторы соответствует характеристикам неспецифического адаптационного синдрома. С учетом собственных, а также имеющихся в медико-биологической литературе сведений о способах оценки состояния организмов проводился отбор тестов для системы. Данная система была успешно апробирована уже в последнее время при изучении влияния самых разнообразных токсических факторов. В частности, были проведены комплексные исследования по влиянию ртути и сопутствующих факторов - кислотности и гумифицированности водоемов - на рыб. Непрерывный биологический мониторинг с помощью рыбного токсикометра обеспечивает быстрое обнаружение токсичных веществ в воде и представляет систему раннего предупреждения в режиме реального времени.

Для изучения поведенческих реакций рыб для использования при мониторинге качества воды исследователи используют синежаберных солнечников. Они позволяют

определить промышленные и сельскохозяйственные загрязнения в водопроводной воде. Изменения окружающей среды вызывают изменения в поведении и характере дыхания рыб. Электроды помещаются в емкости с водой из ближайшей системы водоснабжения, в которых плавает рыба, и в случае изменения условий внутри емкости раздается сигнал тревоги (рис. 1).



Рис. 1. Камера прибора для изучения реакции рыб  
(источник-<https://yandex.ru/images/>)

В новой системе раннего предупреждения, называемой IAC 1090 или "Интеллектуальная Система Биомониторинга Воды", синежаберный солнечник является индикатором токсинов. Эта рыба очень чувствительна к минутным изменениям качества воды и ведет оседлый образ жизни, поэтому она идеально подходит для использования в системе IAC 1090.



Рис. 2. Синежаберный солнечник  
(источник-<https://yandex.ru/images/>)

Для защиты рыбы, каждая рыба заменяется новой, более молодой после трех недель мониторинга водопроводной воды. Эта система, изначально разработанная армией для армии, в настоящее время коммерчески доступна в городах и используется в Нью-Йорке, Сан-Франциско и Вашингтоне.

Принцип работы системы заключается в следующем: восемь молодых синезаберных солнечников плавают в ряду одиночных отсеков, погруженных в водопроводную воду и отделенных от других панелью из матового стекла. К каждой камере прикреплены электроды, которые передают данные о перемещении рыб и характере их дыхания компьютеру. Когда рыба использует мышцы для дыхания, через воду передаются электрические импульсы низкого уровня, фиксируемые с помощью электродов.

Рыба кашляет, сгибая свои жабры, для освобождения дыхательных путей от нежелательных частиц (песчинок). В том случае, если рыба проявляет признаки беспокойства в виде кашля или повышенной активности в ответ на наличие чего-то в воде, система автоматически подает сигнал, отбирает пробы, и предупреждает власти по электронной почте и пейджеру для возможного предотвращения опасности для людей.

#### **2.4. Система биомониторинга с использованием водорослей *Algae Toximeter II***

Токсиметр водорослей позволяет контролировать воду на наличие в ней токсичных веществ.

В данной системе обнаружение таких веществ происходит с помощью водорослей (*Clorella sp.*, *Scenedesmus quadricaudata*). Так как растения имеют короткий жизненный цикл, токсический эффект можно проследить на нескольких поколениях водорослей за относительно небольшой промежуток времени. В токсических тестах на водорослях отслеживаются изменения таких параметров, как число клеток, скорость роста, эффективность фотосинтеза, изменение состава хлорофилла (Павлюк Т.Е., 2015).

Для процедуры измерения необходимо постоянное поступление воды в систему, где происходит определение уровня концентрации водорослей из ферментера и их активности в тестируемых образцах воды. После этого определенная доза водорослей из ферментера добавляется в измерительную камеру токсиметра. Изменение уровня активности водорослей служит индикатором наличия в воде токсических веществ. Взаимодействие токсического вещества с центрами фотосинтеза замедляет метаболическую активность водорослей. Степень замедления активности можно

определить путем сравнения уровня активности водорослей, находящихся в ферментере, и водорослей, добавленных в тестируемый образец воды.

После каждой процедуры измерения происходит автоматическое очищение измерительной камеры, что предотвращает размножение водорослей и рост биопленки.

Algae Toximeter II генерирует сигналы предупреждения при появлении в воде токсичных веществ. Это позволяет своевременно предотвратить поступление опасных для здоровья веществ в централизованную систему водоснабжения.

## **2.5. Использование системы DaphTox II**

В системе DaphTox II дафнии (небольшие свободноплавающие в толще воды рачки) помещаются в прозрачный блок с проточной водой. Контроль перемещения животных в воде, поступающей из поверхностного водоисточника, осуществляется с помощью инфракрасных лучей, проходящих через кювету. В случае появления токсических веществ активность перемещения дафний может изменяться. Последующее резкое и сильное повышение или снижение двигательной активности животных служит критерием срабатывания сигнальной системы хлорофилла (Павлюк Т.Е., 2015).

На основе расширенного дафния-теста была разработана система Daphnia Toximeter. Через камеру с дафниями постоянно проходит тестируемая вода. Фотоснимки, записанные камерой, сразу же обрабатываются в онлайн-режиме и позволяют проанализировать изменения в поведении тест-организмов. Если эти изменения являются статистически значимыми (более двух животных одновременно демонстрируют необычное поведение), то вырабатывается сигнал тревоги. Данная система требует обслуживания раз в 7 дней и более.

Воздействие человека на природу может привести к исчезновению отдельных видов животных и растений и необратимо изменить естественную среду обитания будущих поколений. Из множества факторов, негативно влияющих на экосистему Финского залива, выделяются такие, как загрязнение сельскохозяйственными стоками, неочищенными промышленными и бытовыми стоками, разливы нефтепродуктов и другие. Указанные факторы приводят к снижению видового разнообразия и важнейших природных и культурных ценностей, создают риск безопасного существования людей.

Улучшение экологической ситуации в российской части Финского залива возможно лишь при проведении природоохранных мероприятий всего бассейна Ладожского озера. Кроме того, для уменьшения процессов эвтрофирования

прибрежных акваторий необходима очистка стоков и береговой зоны района. При этом сокращение сброса биогенных веществ должно соответствовать концентрациям, рекомендуемым ХЕЛКОМ.

Также чистота Финского залива, как и всех других водоемов, во многом будет зависеть и от отношения людей, использующих прилегающие пляжные территории для отдыха. При современных темпах хозяйственной активности и отсутствии надлежащих природоохранных мер эта территория может превратиться в промышленную зону. Поэтому для сохранения экосистем необходимы новые концепции развития, основанные на совместном существовании природы и общества.

## **2.6. Биоэлектронная система мониторинга кардиоактивности раков**

Для развития биологических методов контроля состояния водных экосистем в режиме реального времени огромный интерес представляет направление, основанное на использовании измерения реакций биологических объектов физиологических и поведенческих экотоксикологических биомаркеров. Экотоксикологический биомаркер – это биохимическое, клеточное, физиологическое или поведенческое изменение, которое может быть обнаружено и измерено в тканях или в образцах жидкостей организма, или на уровне целого организма. Это доказывает факт подверженности исследуемого организма воздействию одного или большего числа химических загрязняющих веществ и/или физических факторов (Depledge M.H. et.al., 1995).

В настоящее время при необходимости оценки состояния водных экосистем все большее распространение получают и технологии, базирующиеся на использовании экотоксикологических биомаркеров. Наибольшие успехи в развитии инструментальных биологических методов и технологий оценки качества поверхностных вод в режиме реального времени достигнуты в направлении, основанном на использовании физиологических и поведенческих экотоксикологических биомаркеров для неинвазивного измерения реакций бентосных беспозвоночных с экзоскелетом (раков, крабов, раковинных моллюсков) на изменения качества среды их обитания. Измерительные системы, с помощью которых регистрируют такие показатели, получили название биоэлектронных. Биоэлектронные системы – это такие информационно-измерительные системы, в которых животные непосредственно включены в состав первичных преобразователей, являясь неотъемлемой частью электронной системы регистрации тех или иных физиологических или поведенческих биомаркеров. При проведении биоиндикации качества воды такие инструментальные

экофизиологические методы являются предпочтительными, так как они позволяют интегрально оценить воздействие загрязняющих веществ на биоту и дают возможность экспрессной оценки состояния водных экосистем.

Наиболее удачными для использования в биоэлектронных системах в качестве тест-организмов оказались макробентосные беспозвоночные с жестким наружным скелетом, в частности раки. Они удовлетворяют следующим требованиям: чувствительность к изменению физико-химических факторов своей среды обитания, достаточно высокая продолжительность жизни, широкая распространенность в водных системах, хорошая изученность с точки зрения особенностей функционирования их жизнеобеспечивающих систем, низкая локомоторная активность, удобство для применения используемых экофизиологических методов оценки ФС как отдельных особей, так и популяции в целом (по выборке ее представителей). Последнее обеспечивается именно наличием жесткого наружного покрова, который позволяет без стрессирования животных на длительное время закреплять на них миниатюрные измерительные датчики.

В качестве физиологических биомаркеров в биоэлектронных системах используются характеристики кардиоактивности животных: частота сердечных сокращений (ЧСС) или ее обратная величина – средняя величина кардиоинтервала ( $KI_{cp}$ ), стресс-индекс ( $SI=1/2*KI_{cp}*CKO^2$ ), коэффициент вариации (CV) индивидуальных ЧСС тест-организмов исследуемой выборки.

На основе биоэлектронных систем возможно развитие как пассивных, так и активных методов биоиндикации. В первом случае проводятся непрерывные измерения непосредственно на исследуемой территории, а также анализ в реальном времени динамики изменения поведенческих и/или физиологических биомаркеров специально отобранных референтных тест-организмов, свободно живущих в исследуемой природной водной среде, с помощью которых можно выявлять отклонения от нормы, являющиеся признаками стрессового воздействия на этих животных, обусловленные возникновением острой токсичности их среды обитания. Во втором - оценки экологического статуса акваторий проводятся на основе поиска и изучения отклонения от нормы-реакции животных из природной микропопуляции исследуемой акватории на стандартизованные тест-воздействия - функциональные нагрузки, вызывающие непродолжительное стрессовое воздействие на тест-организм, находящийся в условиях своего обитания в природе или близких к ним.

Референтная группа тест-организмов (биоиндикаторов) – «специально отобранная группа здоровых животных (без повреждений и признаков заболеваний),

функциональное состояние которых определено и однородно по своим физиологическим реакциям и биохимическим показателям» (Холодкевич С.В. и др., 2011).

Основным критерием, по которому наиболее целесообразно формировать эти группы является ФС животного, которое характеризуется адекватной мобилизацией функций организма при оптимальном уровне активности всех его систем, соответствующей требованиям деятельности организма. Животные, находящиеся в состоянии динамического рассогласования функций, при которых рассматриваемая система, например, сердечно-сосудистая, работает с повышенным напряжением или не в полной мере обеспечивает деятельность организма, будут составлять группу, не пригодную для использования их в качестве биоиндикаторов (например, для раков таким состоянием, кроме болезни, являются стадии личиночного цикла).

В настоящее время при пассивном биомониторинге для достоверной оценки экологического состояния водных акваторий широко используют автоматизированные биоэлектронные системы ранней диагностики и предупреждения угроз экологической безопасности. Такие системы основаны на диагностике функционального состояния представителей биоты (ее ключевых видов) в конкретной изучаемой экосистеме, где уже имели место негативные воздействия природного и/или антропогенного характера или существует вероятность таких угроз (Kuznetsova T.V. et.al, 2018). При этом во всех известных биоэлектронных системах в качестве биомаркеров бентосных беспозвоночных используются рассмотренные выше поведенческие характеристики (движение створок моллюсков) и/или характеристики кардиоактивности ракообразных и моллюсков.

Наиболее развитыми из них к настоящему времени являются разработанные в 90-е годы прошлого века биоэлектронные системы, основанные на отведении кардиоактивности бентосных беспозвоночных с жестким наружным покровом (раков, крабов, раковинных моллюсков) (Холодкевич С.В. и др., 2011).

### ГЛАВА 3. ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КАРДИОАКТИВНОСТИ МОЛЛЮСКОВ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА В РЕКРЕАЦИОННЫХ АКВАТОРИЯХ КУРОРТНОГО РАЙОНА Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

#### 3.1. Физико-географическое описание района исследований в Финском заливе

Среди существующих методов биоиндикации предпочтение было отдано перспективному методу, который основывается на неинвазивном измерении характеристик кардиоактивности местных видов макробентосных беспозвоночных, а именно двустворчатых пресноводных моллюсков *Unio pictorum* (L., 1758) и *Anodonta anatina* (L., 1758). Для осуществления данного метода применяется лазерный волоконно-оптический фотоплетизмограф, разработанный в Научно-исследовательском центре экологической безопасности Российской Академии наук НИЦЭБ РАН.

Территория Курортного района была выбрана неслучайно, так как в широко протянувшемся районе наблюдается различная степень антропогенного воздействия на воды Финского залива, что позволило высказать предположения о возможных результатах исследования.

Курортный административный район Санкт-Петербурга является одним из самых экологически чистых районов Северной столицы. Находится в северо-западной части пригородной зоны, вдоль побережья Финского залива полосой 4-12 км и длиной более 50 км. Центр района-город Сестрорецк, в состав входит также город Зеленогорск и 9 поселков: Белоостров, Солнечное, Песочный, Комарово, Репино, Серово, Ушково, Смолячково и Молодежное (<https://www.votpusk.ru>).

Курортный район представляет собой территорию, обладающую уникальным природным потенциалом и рекреационными ресурсами, имеющими как региональное, так и федеральное значение.

На территории района можно наблюдать такие природные ландшафты, как приморская терраса, низменные плоские волнистые равнины, сложенные озерноледниковыми песками и супесями, низменные и повышенные плоско-волнистые равнины, сложенные суглинками, болота. В залив вдаются две косы-Дубковская и Тарховская. На участке Тарховка-Курорт и далее полосой вдоль моря протягиваются дюны.

Климат в районе определяется как переходный от морского к континентальному. Среднегодовая температура составляет +3,4°C.

Средняя влажность воздуха на территории района составляет 80%, что позволяет отнести данную территорию к зоне повышенного увлажнения. На формирование климата основное влияние оказывает ветровой режим. Среднегодовая скорость ветра – 4,1 м/с, преобладающее направление летом – западное, зимой – восточное и юго-западное. Гидрографическая сеть разветвленная. Грунтовые воды образуют единый горизонт пластовых вод. Питание водоносного горизонта осуществляется за счет атмосферных осадков, озера Разлив и реки Сестры.

В почвенном покрове преобладают подзолистые почвы и торфяные подзолы. Разнообразен животный и растительный мир. Лесообразующие породы: сосна, ель, береза, ольха и осина. Леса занимают около 40 % территории района. Заболоченность территорий составляет 9% (<http://www.baltfriends.ru>).

Основными природными лечебными факторами Курортного района Санкт-Петербурга являются: мягкий климат (влажный, приморский умеренных широт), запасы хлоридной натриевой (Сестрорецк) и хлоридно-гидрокарбонатной натриево-кальциевой воды (Зеленогорск); сапропелевые грязи, живописные ландшафты: сосновые леса, морское побережье с обустроенными для отдыха пляжами и многочисленные озера. Поэтому петербуржцы и гости северной столицы с удовольствием посещают эти места с целью туризма и санаторно-курортного отдыха.

В Курортном районе в настоящее время находится более 40 постоянно функционирующих санаториев, профилакториев, пансионатов, домов отдыха, горнолыжных и туристических комплексов. Наиболее известные санатории – «Белые ночи», «Северная Ривьера», «Дюны», «Балтийский берег», «Репино», «Сестрорецкий курорт»; пансионаты – «Восток-6», «Буревестник», «Балтиец»; санатории для детей – «Комарово», «Детские Дюны», «Солнечное».

На территории района находятся особо охраняемые территории: заказник «Сестрорецкое болото», «Озеро Щучье», «Левашовский лес», «Комаровский берег» и другие, основной целью деятельности которых является сохранение природной среды района (<https://www.votpusk.ru>).

Один из крупных внутренних водоемов – Сестрорецкий Разлив – является также и старейшим водохранилищем. В последнее время этот искусственный водоем постепенно мелеет, в нем становится все больше мест, в которых глубина дна составляет чуть больше метра. Экологическое состояние Сестрорецкого Разлива является неблагоприятным, и основными загрязнителями водохранилища являются его водные артерии, а именно: реки Сестра и Черная. Эти реки, в свою очередь, страдают

от сточных вод поселка Черная Речка, ОЖД (Октябрьской железной дороги), неочищенных стоков коттеджных поселков и садоводств (<http://www.kurort-news.ru>).

Кроме того, свой вклад в загрязнение этих рек вносят стоки практически не функционирующих очистных сооружений поселка Сертолово, а также сбросы поселков Белоостров (промзона), Дюны и Ленинское (животноводческий комплекс). Многочисленные несанкционированные свалки, расположенные в водоохранной зоне реки Сестры, также оказывают неблагоприятное экологическое воздействие на данную водную артерию. В непосредственной близости от реки Черной находятся отстойники ливневых вод ЗСД, в которых во много раз фиксируется превышение предельно допустимых нормативов по загрязняющим веществам (меди, цинку, ртути, хлоридам) (<http://www.kurort-news.ru>).

Превышение ПДК (по данным наблюдений 2002 г.) для рыбохозяйственных водоемов отмечалось по железу – в 40 раз, по марганцу – в 2-8 раз, по алюминию – в 3-4 раза, по фенолам в 1,2-11 раз, по нефтепродуктам – в 1,1-4 раза (<http://www.aroundspb.ru>). Если высокие концентрации железа, марганца и фенолов можно в какой-то мере объяснить естественными факторами, то повышенное содержание нефтепродуктов и алюминия связано с антропогенным загрязнением. Реки Сестра и Черная имеют примерно одинаковый уровень загрязненности, но ввиду того, что сток Сестры больше, то и загрязняет она Сестрорецкий разлив тоже больше.

Рекреационная зона на побережье Сестрорецкого Разлива является любимым местом отдыха не только жителей близлежащих поселков, но и петербуржцев, однако из-за повышенной концентрации вредных веществ в воде экологическими службами все чаще накладывается запрет на купание в водоеме.

Для улучшения состояния Сестрорецкого разлива экологами было предложено переключить сбросы сточных вод на городскую канализационную сеть или построить локальные очистные сооружения, а также очистить водоохранные зоны реки Черной и Сертоловского ручья.

Для оценки экологического состояния акваторий с нестабильной экологической обстановкой, к которым относятся прибрежные и эстуарные экосистемы, целесообразным является применение методов, основанных на использовании биомаркеров, что позволяет получить интегральную оценку состояния водоема по физиологическому состоянию населяющих его животных.

С помощью системы мониторинга состояния бентосных беспозвоночных можно вести наблюдения как в пресных и солоноватых прибрежных водах, так и в более соленых водах в глубине залива. Для исследования использовался первый вариант,

а в качестве точек отбора животных были выбраны территории Курортного района г. Санкт-Петербурга, а именно:

1. Акватория, прилегающая к парку «Дубки» (г. Сестрорецк).
2. Пляж «Чудный» в поселке Репино, являющийся местом отдыха большого количества людей. В непосредственной близости от залива располагаются 3 ресторана, гостиница, а также административное здание.
3. «Золотой пляж» города Зеленогорска, также приспособленный для отдыха населения.
4. Побережье Финского залива в 3,5 км от железнодорожной станции Ушково (поселок Ушково), в близости к пляжу «Детский».

Исследования предыдущих лет показали, что акваторию Восточной части Финского залива, прилегающая к парку «Дубки», можно считать условно фоновой. В то же время при анализе состояния акваторий, прилегающих к поселку Репино и городу Зеленогорску, становится очевидным нарушение их состояния в результате усиленного антропогенного воздействия: наличие на данной территории санаториев, гостиниц, кафе, ресторанов, осуществляющих сбросы коммунально-бытовых сточных вод.

В сентябре-октябре 2018 года отбор организмов – потенциальных биоиндикаторов был произведен в прибрежной зоне парка «Дубки» (Центральный парк культуры и отдыха города Сестрорецка) (60°05'22" с. ш. 29°55'51" в. д.) и на территории, прилегающей к пляжу «Детский» поселка Ушково (60°11'59" с. ш. 29°37'01" в. д.). Летом этого же года были предприняты попытки сбора животных на пляжах города Зеленогорска (60°12' с. ш. 29°42' в. д.) и поселка Репино (60°10'08" с. ш. 29°52'20" в. д.). Сотрудники Зоологического института сообщают о нахождении местных видов двустворчатых моллюсков в данных пунктах в 2013 году, однако, несмотря на тщательный поиск, в 2018 году на этих территориях двустворчатых моллюсков обнаружено не было. Годом ранее, в 2017 году, также предпринимались попытки отбора тест-организмов в Репино и Зеленогорске, тогда удалось собрать по восемь особей, однако все они находились в удовлетворительном состоянии и не могли выполнять функции индикаторов состояния данных акваторий.

Исчезновение животных из данных мест обитания связано с проведением насыпных работ в рекреационных целях (обустройство пляжей для отдыха населения), что привело к нарушению устойчивости экосистем Восточной части Финского залива на территориях города Зеленогорска и поселка Репино и, как следствие, исчезновению животных из привычной среды их обитания.

Ранее метод регистрации и анализа активности сердца (кардиоактивности) был применен при исследовании качества воды в Восточной части Финского залива в районе Сестрорецка, Репино и Зеленогорска (Холодкевич и др., 2019). Появилось предположение того, что, двигаясь далее от Зеленогорска, состояние экосистем Восточной части Финского залива может постепенно улучшаться за счёт снижения антропогенной нагрузки на побережье.

Таким образом, для дальнейшего исследования состояния Финского залива на территории других прибрежных поселков была осуществлена поездка в поселок Ушково. Пляж в Ушково является не таким многолюдным, как, например, в Зеленогорске или Репино, на прилегающей территории нет ни предприятий общественного питания, ни санаториев, поэтому удалось собрать животных в количестве 30 штук и в условиях НИЦЭБ РАН провести анализ их кардиоактивности.

Для исследований был разработан лазерный волоконно-оптический фотоплетизмограф, а в 2003–2004 гг. было разработано программное обеспечение, позволяющее в режиме реального времени оценивать уровень стрессированности бентосных беспозвоночных с жестким наружным покровом (раков, крабов и раковинных моллюсков).

Для регистрации кардиоактивности тестируемых животных с внешней стороны их жесткого наружного покрова неинвазивно (без его повреждения), на раковину моллюска над местом расположения сердца приклеивают специальный миниатюрный держатель, в котором затем фиксируют волоконно-оптический датчик (общий вес не превышает 2 г).

Как показал многолетний опыт их использования, датчик не оказывает влияния на нормальную жизнедеятельность ни ракообразных, ни моллюсков. Животные с закрепленным датчиком могут несколько месяцев подряд находиться в нормальном физиологическом состоянии: питаться, передвигаться по дну аквариума, осуществлять иные поведенческие реакции.

В качестве интегрального ответа организма на изменение факторов среды обитания может рассматриваться реакция кардиосистемы (Depledge M.H. et.al., 1996). ЧСС во многих случаях позволяет сделать вывод о функциональном состоянии организма. А развитие новых систем регистрации кардиоактивности дает возможность исследовать кардиоактивность местных видов макробентосных беспозвоночных в лабораторных условиях.

В частности, использование двустворчатых моллюсков в биоэлектронных системах позволяет выявлять любые резкие изменения среды, в том числе

устанавливать наличие сбросов токсичных загрязнителей любой природы в акватории Финского залива.

### 3.2. Исследование кардиоактивности моллюсков-биоиндикаторов

Настоящее исследование включало в себя поиск и отбор животных-биоиндикаторов, а именно: пресноводных двустворчатых моллюсков - *Unio pictorum* (L., 1758) – перловицы, и *Anodonta anatina* (L., 1758) – беззубки, обитающих на побережье Восточной части Финского залива на территории Курортного района г. Санкт-Петербурга.

Летом и осенью 2018 года были предприняты поездки на северное побережье восточной части Финского залива. Маршрут был построен следующим образом:

- побережье Финского залива в 3,5 км от железнодорожной станции Ушково (поселок Ушково), в близости к пляжу «Детский»
- «Золотой пляж» города Зеленогорска
- пляж «Чудный» в поселке Репино
- акватория, прилегающую к парку «Дубки» (г. Сестрорецк).

В результате всех выездов местные виды моллюсков в пригодном для лабораторных экспериментов состоянии *Anodonta anatina* и *Unio pictorum* были найдены лишь в двух пунктах – в близости к пляжу «Детский» в поселке Ушково (рис.3) и на мелководье, примыкающему к парку «Дубки» (рис. 4).

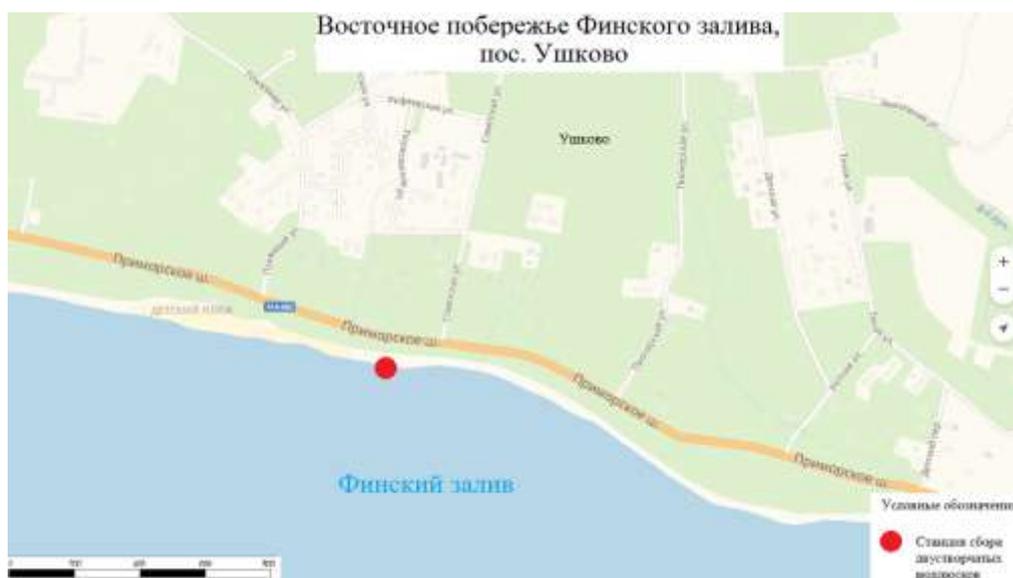


Рис.3. Местоположение станции сбора двустворчатых моллюсков для исследования (пос. Ушково) (источник-<https://yandex.ru/maps/>)

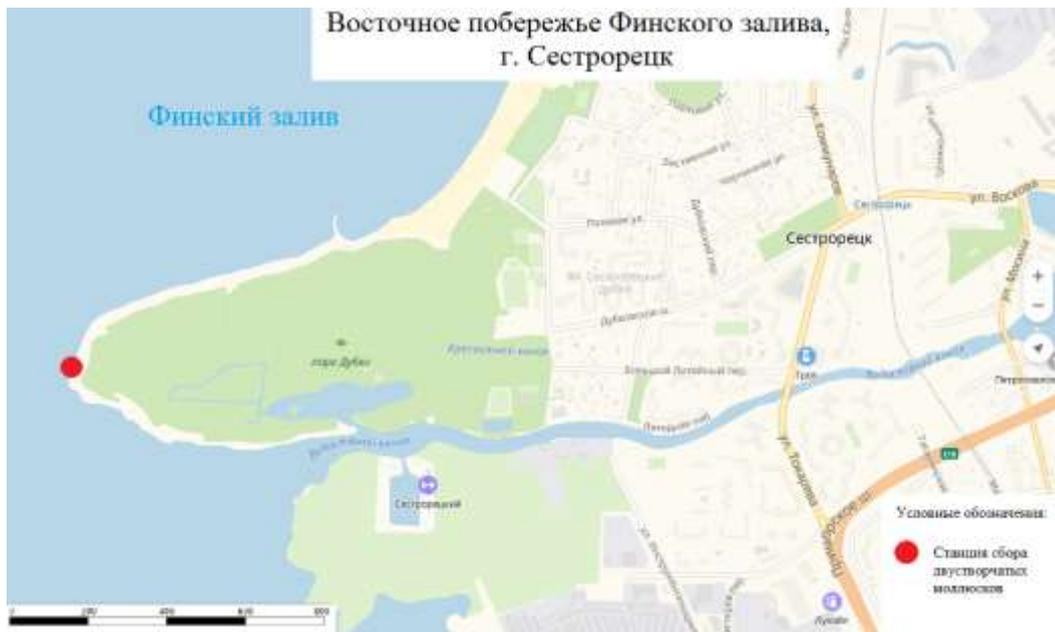


Рис. 4. Местоположение станции сбора двустворчатых моллюсков для исследования (парк «Дубки») (источник-<https://yandex.ru/maps/>)

В вышеназванных пунктах вручную в воде на глубине 0,5 м было отобрано необходимое для проведения экспериментов количество особей, все они были помещены в пластиковые контейнеры и в течение 2-х часов доставлены в лабораторию НИЦЭБ РАН, где выпущены в аквариум с постоянной принудительной аэрацией и природной водой с места их сбора. После этого им было отведено время от 1 до 2 суток для акклимации к лабораторным условиям.



Рис.5. Сбор двустворчатых моллюсков вручную в парке «Дубки» (фото автора)



Рис.6. Двустворчатый моллюск вида *A. anatina*, отобранный в парке «Дубки»  
(фото автора)



Рис. 7. Подготовка к определению размерно-возрастных характеристик моллюсков  
видов *A. Anatina* и *U. Pictorum* (фото автора)

В лабораторных условиях с помощью штангенциркуля была измерена длина раковины каждого моллюска, а по полукольцам прироста определен примерный возраст особей. Длина раковины животных вида *A. anatina* (парк «Дубки») варьировала в диапазоне от 55,2 мм до 72,5 мм, *A. anatina* (пос. Ушково) – от 65,3 до 75,4, *U.*

*pictorum* (парк «Дубки») – от 67,2 до 73 мм, *U. pictorum* (пос. Ушково) – от 60,4 до 76,5 мм.

Возраст моллюсков вида *A. anatina* (парк «Дубки») от 3 до 7 лет, *A. anatina* (пос. Ушково) – от 2 до 6, *U. pictorum* (парк «Дубки») – от 5 до 7, *U. pictorum* (пос. Ушково) – от 4 до 6. Предпочтение отдавалось животным со средними размерами. Данные измерений объединены в таблицу №1.

Табл. 1 Размерно-возрастные характеристики изученных моллюсков, отобранных в разных пунктах

Станция сбора моллюсков	Вид	Возраст, лет	Длина раковины, мм
Парк «Дубки»	<i>A. anatina</i>	4	57,2
Парк «Дубки»	<i>A. anatina</i>	6	71
Парк «Дубки»	<i>A. anatina</i>	7	75,5
Парк «Дубки»	<i>A. anatina</i>	5	72
Парк «Дубки»	<i>A. anatina</i>	7	72,1
Парк «Дубки»	<i>A. anatina</i>	4	60,2
Парк «Дубки»	<i>A. anatina</i>	5	64,1
Парк «Дубки»	<i>A. anatina</i>	6	71,5
Парк «Дубки»	<i>A. anatina</i>	4	58
Парк «Дубки»	<i>A. anatina</i>	3	55,2
Парк «Дубки»	<i>A. anatina</i>	5	62,7
Парк «Дубки»	<i>U. pictorum</i>	7	73
Парк «Дубки»	<i>U. pictorum</i>	5	67,2
пос. Ушково	<i>A. anatina</i>	5	71,5
пос. Ушково	<i>A. anatina</i>	4	68,3
пос. Ушково	<i>A. anatina</i>	6	70,2
пос. Ушково	<i>A. anatina</i>	4	64,6
пос. Ушково	<i>A. anatina</i>	3	73,1
пос. Ушково	<i>A. anatina</i>	2	55,3
пос. Ушково	<i>A. anatina</i>	5	75,4
пос. Ушково	<i>A. anatina</i>	4	67,2
пос. Ушково	<i>A. anatina</i>	4	69,4
пос. Ушково	<i>U. pictorum</i>	4	56,5

пос. Ушково	<i>U. pictorum</i>	4	60,1
пос. Ушково	<i>U. pictorum</i>	6	75,2

На створку каждого тестируемого моллюска над областью расположения сердца гелем марки «Момент» наклеивали миниатюрные держатели волоконно-оптического зонда и проводили постоянную регистрацию биений сердца.



Рис. 8. Моллюск с наклеенным миниатюрным держателем волоконно-оптического зонда (фото автора)

Диагностика функционального состояния моллюсков производилась путем измерения и анализа характеристик их сердечной активности до, во время изменения солености и после восстановления начальной солености среды с помощью системы регистрации. Блок-схема установки приведена на рис.9.

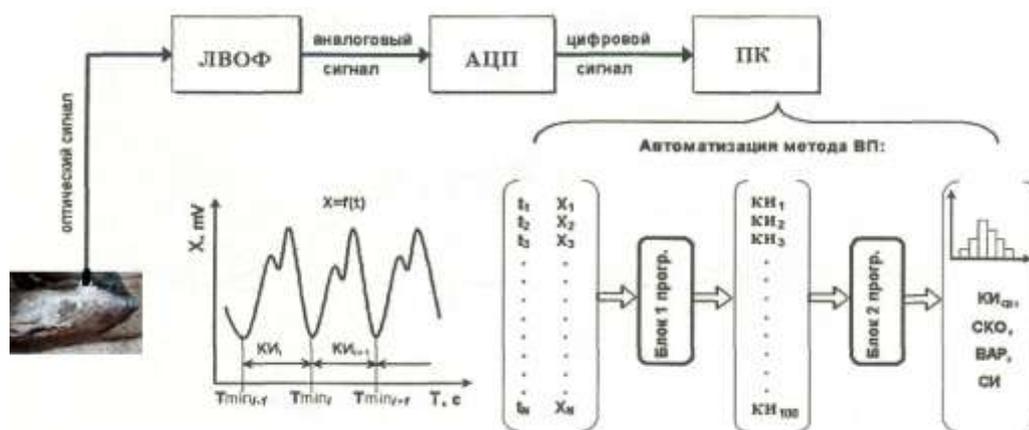


Рис. 9. Блок-схема регистрации и этапы анализа кардиоритма моллюска (Холодкевич и др., 2015)

ЛВОФ – лазерный волоконно-оптический фотоплетизмограф, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПК – персональный компьютер, КИ – кардиоинтервалы, СКО – среднее квадратичное отклонение, ВАР – показатель variability ритма, СИ- стресс-индекс.

Регистрация сигнала, вычисление статистических характеристик и архивация полученных данных были возможны благодаря программе VarPulse. Моллюски были помещены в аквариум с природной водой из места отбора животных и находились в нем при условии постоянного поступления кислорода. Было использовано время адаптивного восстановления ЧСС до фонового уровня (после возвращения моллюсков к исходным условиям обитания) в соответствии с рекомендациями работы (Kholodkevich S.V. et. al., 2011).



Рис. 10. Моллюски с закрепленными на створках волоконно-оптическим датчиками для регистрации кардиоактивности

(Холодкевич и др., 2015)



Рис. 11. Установка для многоканальной регистрации кардиоактивности животных (фото автора)

После акклимации отобранных моллюсков в лабораторных условиях вода из естественной среды обитания была заменена на соленую (6 г/л NaCl). Практически сразу (1-2 минуты) последовала реакция моллюсков на изменение солености воды - закрытие створок. То есть при изменении солености воды имеет место защитно-оборонительная двигательная реакция моллюсков. Они изолируются от окружающей среды и переходят на анаэробный обмен, который сопровождается снижением ЧСС.

По истечении некоторого промежутка времени (в нашем случае прошло около 1 часа) снова происходит замена воды на природную пресную воду. В ответ на эту процедуру моллюски начинали открывать створки раковины.

Индикативным показателем было время, необходимое моллюскам для восстановления ЧСС, которую наблюдали до теста с изменением солености. Результат эксперимента во многом определяется адаптивным потенциалом моллюсков: чем он выше, тем меньше времени понадобится моллюскам для восстановления. Если их состояние ослаблено хроническим загрязнением их среды обитания, то таким моллюскам потребуется больше времени на восстановление фоновой ЧСС.

### **3.3. Обработка и анализ характеристик кардиоритма моллюсков**

В процессе выполнения работы необходимо было подобрать параметры анализа кардиоритма исследуемых моллюсков в стандартном программном обеспечении «VarPulse» (версия 9.2), используемом для этих целей в лаборатории профессора С.В. Холодкевича. Такая необходимость была связана с особенностями кардиоритма моллюсков.

Программа VarPulse считывает исходную фотоплетизмограмму по нескольким независимым каналам опроса в виде цифрового сигнала с аналого-цифрового преобразователя (АЦП), производит необходимую цифровую фильтрацию сигнала, определение кардиоинтервалов, накопление выборки кардиоинтервалов и ее анализ по методу вариационной пульсометрии с целью получения статистических характеристик оценки функционального состояния животного-биоиндикатора.

Для автоматического подсчета кардиоритмов тестируемых моллюсков были выбраны оптимальные значения фильтров для каждого из каналов.

Для изменения индивидуальных настроек каналов в программе VarPulse используется окно «Settings» для вызова которого на экран необходимо в пункте меню «Settings» выбрать подпункт «Channels»:

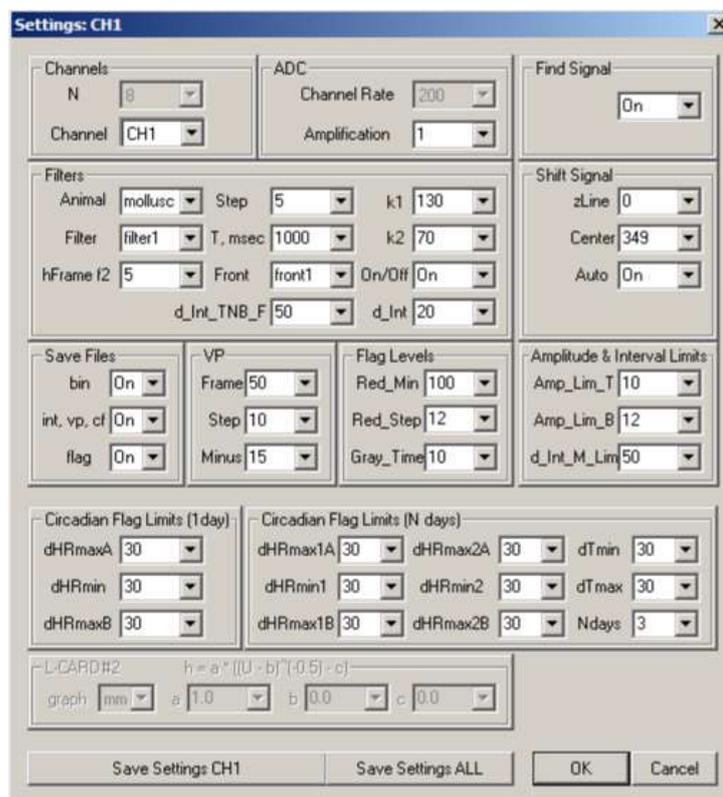


Рис. 12. Окно «Settings» («Настройки»)

(Инструкция пользователя «VarPulse» (версия 9.2 от 15.02.2013 и выше)

Для выбранного канала включили сохранение данных и выбрали папку (документ), в котором эти данные будут сохраняться.

При помощи фильтра был выбран вид животного (в нашем случае – моллюск).

Регистрация ЧСС отобранных моллюсков производилась непрерывно в течение всего эксперимента, при этом одновременно регистрировалась ЧСС у 8-16 особей. Средние значения рассчитывались по 50 кардиоинтервалам с шагом 10 интервалов. Все полученные данные о функциональном состоянии моллюсков были записаны и сохранены в компьютере для их последующего анализа. Анализ данных изменения ЧСС проводился с помощью MS Excel.

Фотоплетизмограмма сохранялась в одном файле на все каналы. Значения кардиоинтервалов сохранялись в отдельном файле на каждый канал.

### 3.4. Особенности кардиоответов моллюсков из разных акваторий Финского залива как показатели степени хронического загрязнения мест обитания ЭТИХ МОЛЛЮСКОВ

Оценка сердечного ритма пресноводных двустворчатых моллюсков производилась с учетом возраста моллюсков, их состояния и температуры окружающей среды (воды и воздуха).

Значения средних ЧСС групп моллюсков, их стабильность и динамика (например, скорость восстановления после внешних воздействий) служат интегральной и быстро определяемой характеристикой общего физиологического состояния моллюсков, что дает возможность оценивать благоприятность их среды обитания по совокупности факторов среды.

В работе были определены фоновые показатели кардиоритма для моллюсков из двух станций обследования (парк «Дубки» (рис.13) и пос. Ушково (рис.14). Как оказалось в результате измерений средних ЧСС фона, межвидовых отличий по этому показателю (т.е. анодонты и унио по средней ЧСС не были обнаружены достоверные отличия, критерий Фишера,  $p \leq 0,05$ ) не наблюдалось. Нормальность распределения значений ЧСС тестировалась с помощью теста Холмогорова (для анализа брались участки кривой ЧСС, когда животные активно фильтровали воду).

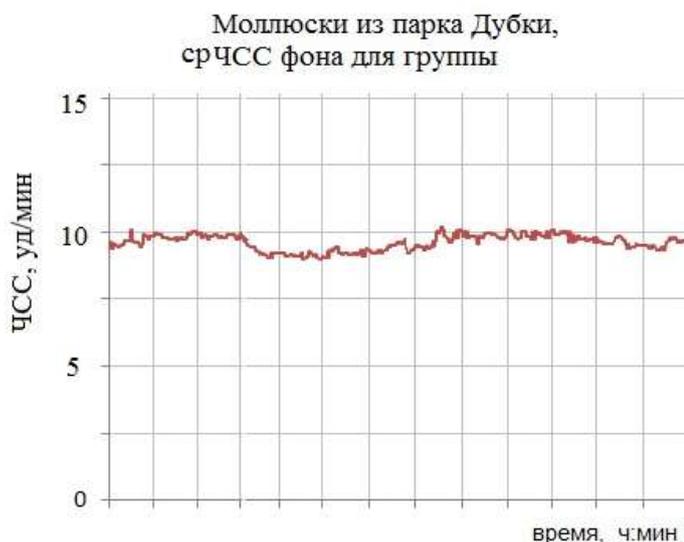


Рис.13. Фоновые показатели кардиоритма для моллюсков парка «Дубки»



Рис.14. Фоновые показатели кардиоритма для моллюсков пос. Ушково

Данное исследование показало, что пресноводные двустворчатые моллюски, отобранные из разных мест, реагируют не одинаково на кратковременное (1-часовое) воздействие соленой воды (6 г/л NaCl). При данном воздействии все моллюски реагировали снижением ЧСС.

Такую реакцию моллюсков можно объяснить тем, что здоровые животные и животные ослабленные, которые обитали в загрязненной, неблагоприятной среде обитания, обладают разной адаптационной способностью к стрессовому воздействию.



Рис.15. Реакция моллюсков парка «Дубки» на изменение солёности среды. Стрелками обозначены моменты начала и окончания тестового воздействия.

Бордовой линией обозначена продолжительность времени восстановления после снятия тестовой нагрузки (соленость)

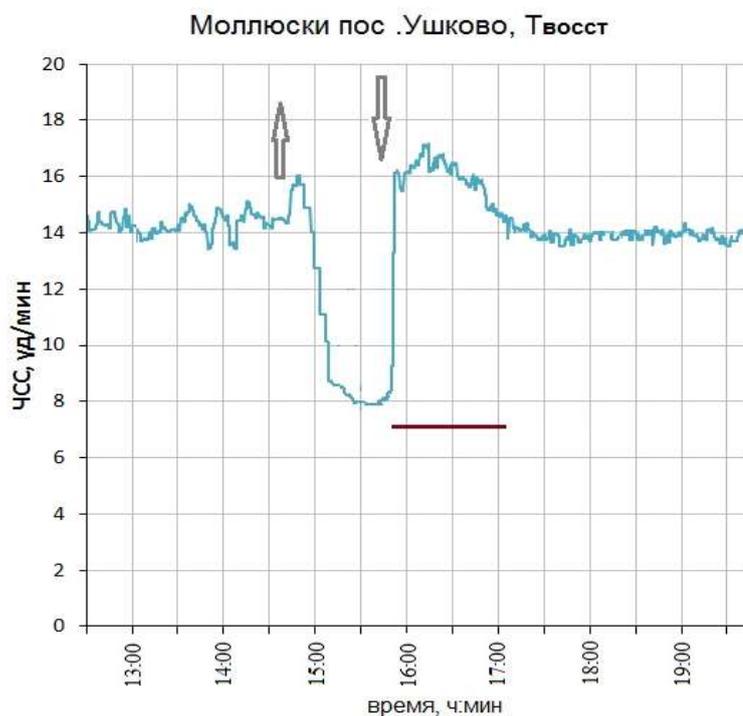


Рис.16. Реакция моллюсков пос. Ушково на изменение солености среды.

Стрелками обозначены моменты начала и окончания тестового воздействия.

Бордовой линией обозначена продолжительность времени восстановления после снятия тестовой нагрузки (соленость)

Данные о среднем времени восстановления кардиоритмов двустворчатых моллюсков, собранных в 2018 году в прибрежной акватории на территориях парка «Дубки» и пос. Ушково, после снятия тестовой нагрузки объединены в таблицу 2.

Табл. 2. Среднее время восстановления кардиоритмов двустворчатых моллюсков, собранных на территориях парка «Дубки» и пос. Ушково после кратковременного (1 час) гиперосмотического воздействия, 2018 год

Станция сбора моллюсков	Дата эксперимента	Твосст ср, мин
Парк «Дубки»	15.10.2018	25
Парк «Дубки»	15.10.2018	14
Парк «Дубки»	15.10.2018	85
Парк «Дубки»	15.10.2018	28
Парк «Дубки»	15.10.2018	71
Парк «Дубки»	15.10.2018	32

Парк «Дубки»	15.10.2018	74
Парк «Дубки»	15.10.2018	61
Парк «Дубки»	15.10.2018	49
Парк «Дубки»	15.10.2018	45
Парк «Дубки»	15.10.2018	58
Парк «Дубки»	15.10.2018	26
Парк «Дубки»	15.10.2018	47
Парк «Дубки»	15.10.2018	34
Парк «Дубки»	15.10.2018	17
Парк «Дубки»	15.10.2018	46
Парк «Дубки»	15.10.2018	15
Парк «Дубки»	15.10.2018	19
Парк «Дубки»	15.10.2018	90
Парк «Дубки»	15.10.2018	83
пос. Ушково	18.09.2018	71
пос. Ушково	18.09.2018	78
пос. Ушково	18.09.2018	80
пос. Ушково	18.09.2018	60
пос. Ушково	18.09.2018	55
пос. Ушково	18.09.2018	70
пос. Ушково	19.09.2018	95
пос. Ушково	19.09.2018	70
пос. Ушково	19.09.2018	71
пос. Ушково	19.09.2018	68
пос. Ушково	19.09.2018	94
пос. Ушково	19.09.2018	101
пос. Ушково	19.09.2018	70
пос. Ушково	19.09.2018	43
пос. Ушково	20.09.2018	63
пос. Ушково	20.09.2018	80
пос. Ушково	20.09.2018	62
пос. Ушково	20.09.2018	81
пос. Ушково	20.09.2018	112
пос. Ушково	20.09.2018	89

Усреднённые значения данного параметра для двух пунктов, исследуемых в 2018 году, представлены на гистограмме (рис.17).

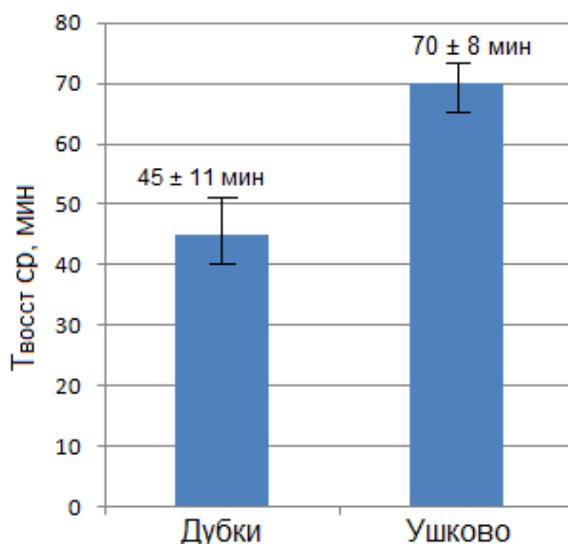


Рис 17. Время восстановления ЧСС ( $T_{\text{восст}}$ , мин) моллюсков из разных акваторий после 1-часового гиперосмотического воздействия, 2018 год

Приведенная ниже гистограмма представляет результаты сравнительной оценки значений времени восстановления для четырёх станций сбора моллюсков, расположенных на побережье Восточной части Финского залива (рис.18).

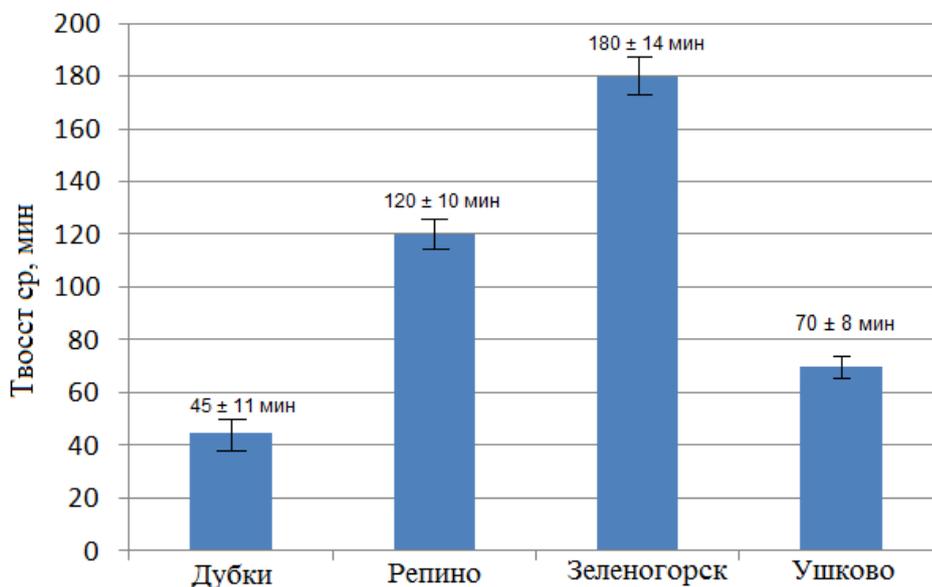


Рис.18. Время восстановления ЧСС ( $T_{\text{восст}}$ , мин) моллюсков из разных акваторий после 1-часового гиперосмотического воздействия.

(Среднее  $T_{\text{восст}}$  для «Дубков» было  $45 \pm 11$  мин, Репино –  $120 \pm 10$  мин, Зеленогорска –  $180 \pm 14$  мин, Ушково –  $70 \pm 8$  мин)

На рис.19 представлена гистограмма, отражающая изменение среднего времени восстановления функционального состояния тест-организмов, собранных в акватории Финского залива вблизи поселка Ушково.

На данной гистограмме показано, что с увеличением времени нахождения моллюсков в лабораторных условиях с момента помещения их в аквариум происходит ослабление уровня адаптивных возможностей исследуемых животных. Наблюдается увеличение длительности восстановительного периода (среднего времени восстановления ЧСС исследуемых моллюсков).

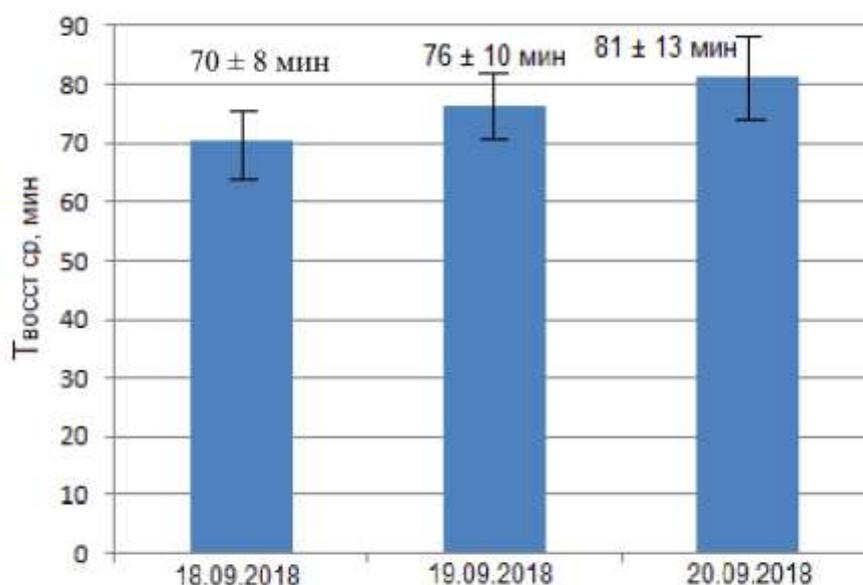


Рис.19. Время восстановления ЧСС ( $T_{восст}$ , мин) моллюсков, отобранных из акватории Финского залива вблизи поселка Ушково, после 1-часового гиперосмотического воздействия в различные дни эксперимента

У особей из загрязненных мест обитания период восстановления после смены солоноватой воды на пресную природную был гораздо продолжительнее (более 120 мин), чем у моллюсков из относительно чистого места (70 мин). В связи с тем, что на территории парка «Дубки» в г. Сестрорецке Курортного района г. Санкт-Петербурга отсутствуют локальные источники загрязнения (выпуски сточных вод от ресторанов, санаториев), акватория в этом районе может считаться условно фоновой для эстуария Невской губы по некоторым гидробиологическим и гидрохимическим показателям (Алимов А.Ф., Голубков С.М., 2008). В противоположность этому пункту акватория пляжа «Детский» подвергается значительной антропогенной нагрузке в летнее время, когда пляж посещает

значительное число отдыхающих. Эти обстоятельства в совокупности не могут не отражаться на состоянии животных и других гидробионтов данной акватории Финского залива в летнее время (июле-августе). Однако остальные 10 месяцев в году антропогенная нагрузка на акваторию значительно ниже, чем акватории поселков Репино ( $T_{\text{восст}}=120\pm 10$  мин), Комарово и Зеленогорска ( $T_{\text{восст}}=180\pm 14$  мин) за счет отсутствия вблизи берега жилых домов и точек общепита. Поэтому функциональное состояние обитающих в этой акватории моллюсков почти не отличается от моллюсков референтной акватории напротив парка Дубки в Сестрорецке.

Табл. 3. Ранжирование экологического статуса пресноводных акваторий по  $T_{\text{восст}}$  (Холодкевич и др., 2019)

Экологический статус	$T_{\text{восст}}$ , мин
Высокий	< 50
Хороший	50–70
Посредственный	70–100
Плохой	100–200
Очень плохой	> 200

С учетом данных таблицы 3 можно сделать вывод о том, что экологический статус акватории в районе поселка Ушково можно отнести к категории «хороший», в отличие от экологического статуса акваторий в районе Репино, Комарово и Зеленогорска, относящихся к категории «плохой», для своевременного выявления и предупреждения необратимых изменений в состоянии экосистем которых необходимо регулярно проводить исследования качества воды. Длительное пребывание под воздействием неблагоприятных факторов вызывает снижение адапционных способностей животных в этих акваториях (Холодкевич и др., 2019), на что указывает увеличение до 100-180 минут времени восстановления ЧСС моллюсков после тест-воздействия, по сравнению с референтной, фоновой акваторией «Дубки».

## ВЫВОДЫ

1. Неинвазивная система регистрации и онлайн-анализ кардиоактивности моллюсков и раков является современной и экономически эффективной, данный метод исследования является экспрессным и оперативным. Его можно рекомендовать для использования в программах экологического мониторинга водных экосистем для предотвращения любых неблагоприятных воздействий на биоту и человека.

2. Лазерной волоконно-оптической системы мониторинга ЧСС позволяет оценивать в реальном времени функциональное состояние моллюсков, что может быть использовано в целях мониторинга экологического состояния водных объектов, в частности, акваторий Восточной части Финского залива.

3. В результате проведенного исследования обнаружено, что местные виды моллюсков, взятые из загрязненной акватории, отличаются от аналогичных животных из референтного (условно чистого) места временем восстановления паттернов кардиоактивности после стандартизованного тест-воздействия.

4. Система регистрации и метод тестирования моллюсков существенно дополняет современные методы биоиндикации качества поверхностных и сточных вод как среды обитания гидробионтов и способствует обеспечению экологической безопасности Региона.

5. Характеристики функционального состояния двустворчатых моллюсков (при условии обитания животных в исследуемых водных объектах) удобно использовать для экспресс-оценки состояния водных экосистем в сочетании с уже имеющимися и общепризнанными показателями.

6. Установлено, что в отличие от рекреационных акваторий курортов в поселках Репино, Комарово и г. Зеленогорске, экологический статус акватории поселка Ушково можно отнести к «хорошему».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение хотелось бы отметить, что применение наилучших доступных технологий в области обеспечения экологической безопасности является необходимым и перспективным для своевременного выявления негативных изменений в экологическом состоянии природной среды на раннем этапе загрязнения. Это позволит своевременно принять меры по защите окружающей среды и живых организмов и своевременно предотвратить деградацию сообщества организмов на ранних этапах негативных воздействий на биоту и на водную экосистему в целом.

В данной работе впервые продемонстрирована перспективность применения разработанной в НИЦЭБ РАН технологии в качестве НДТ, позволяющей оперативно выявлять по функциональному состоянию обитающих в прибрежных акваториях моллюсков эффективность очистки сбрасываемых в них сточных вод локальных очистных сооружений. Такая НДТ может эффективно использоваться для решения задач оценки экологического риска и может служить для ранней диагностики и предупреждения угроз экологической безопасности экосистем акваторий Восточной части Финского залива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (с изменениями от 29 июля 2018 г. № 252-ФЗ) (глава 5, ст. 31.1).
2. Directive 2008/1/EC of the European Parliament and of The Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control (Codified version) // Official Journal of the European Union. — № L 24/9. — P. 24-8 – 28-18.
3. Алимов А.Ф., Голубков С.М. (ред.) Экосистема эстуария реки Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы / А.Ф. Алимов, С.М. Голубков. // М. – СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2008, 343 с.
4. Аляутдинов А.Р. и др. Информационные технологии оценки качества вод восточной части Финского залива / А.Р. Аляутдинов, Л.А. Ушакова, Т.В. Артамонова, А.Н. Коршенко, М.П. Погожева // Материалы Международной конференции "Интеркарто/ИнтерГИС" 23. Москва: Издательство Московского Университета, 2016. – Том 1, с. 286-289.
5. Ашихмина Т.Я. и др. Биоиндикация и биотестирование – методы познания экологического состояния окружающей среды / Т.Я. Ашихмина // Киров: ГПУ, 2005. 236 с.
6. Бегак М.В. и др. Наилучшие доступные технологии и комплексные экологические разрешения: перспективы применения в России / М.В. Бегак (ред.), Т.В. Гусева, Т.В. Боравская, Ю. Руут, Я.П. Молчанова, А.И. Захаров, С.П. Сивков // Москва: ООО «ЮрИнфоР-Пресс», 2010.
7. Бегак М.В., Манвелова А.Б. Экологическая модернизация производства как инвестиции в природный капитал / М.В. Бегак, А.Б. Манвелова // Вестник РХТУ им. Д.И. Менделеева Гуманитарные и социально-экономические исследования. В 2-х томах. Том 2. Социально-экономические исследования. Выпуск IV. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013. С. 28-36.
8. Бескид П.П., Куракина Н.И., Орлова Н.В. Геоинформационные системы и технологии / П.П. Бескид, Н.И. Куракина, Н.В. Орлова // СПб: РГГМУ, 2010. 173 с.
9. Жмур Н.С., Орлова Т.Л. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей / Н.С. Жмур, Т.Л. Орлова // Москва: Акварос, 2001. 43 с.
10. Коваценко М. Стоки теряют истоки / М. Коваценко // Строительство и городское хозяйство в Санкт-Петербурге и Ленинградской области, 2017. №171. С.20.

11. Крючихин Е.М. Современные технологии в обеспечении экологической безопасности Санкт-Петербурга и Финского залива / Е.М. Крючихин, А.Н. Николаев, Н.А. Жильникова. – 2004.
12. Кузнецова Т.В. Изменение солености среды как функциональная нагрузка при оценке функционального состояния раков // Журнал эволюционной биохимии и физиологии, 2013. №5. С.348-351.
13. Кузнецова Т.В., Сладкова С.В., Холодкевич С.В. Оценка функционального состояния раков в нормальной и токсической среде по их кардиоактивности и биохимическим показателям гемолимфы // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2010. Т. 46, № 3. С. 203-210.
14. Лукин В., Головкин А. Обзор европейского опыта использования наилучших доступных технологий в государственном регулировании в области охраны окружающей среды / В. Лукин, А. Головкин // В фокусе: корпоративное управление и устойчивое развитие. - Вестник КПМГ, 2017. №7. С.7.
15. Мелехова О.П., Сарапульцева Е.И. (ред.) Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О.П.Мелехова, Е.И.Сарапульцева, Т.И.Евсеева и др. – 2-е изд. Испр. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. 288 с.
16. Мельник Е.А. и др. Биоэлектронная система контроля токсикологической безопасности биологически очищенных сточных вод / Е.А. Мельник, О.Н. Рублевская, Г.А. Панкова, С.В. Холодкевич, А.В. Иванов, Е.Л. Корниенко, С.В. Сладкова, В.А. Любимцев, А.С. Куракин // Водоснабжение и санитарная техника, 2013. С. 7-11.
17. Павлюк Т.Е. Биомониторинг как неотъемлемый инструмент контроля состояния водных ресурсов в России / Т.Е. Павлюк // Чистая вода России-2015: сборник материалов XIII международного симпозиума и выставки «Чистая вода России». Екатеринбург: ФГУП РосНИИВХ, 2015. 683 с.
18. Панкова Г.А., Рублевская О.Н., Мельник Е.А. и др. Биоэлектронная система контроля токсикологической безопасности биологически очищенных сточных вод / Г.А. Панкова, О.Н. Рублевская, Е.А. Мельник // Водоснабжение и санитарная техника, 2013. № 1.
19. Петров О.В. Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря / О. В. Петров // СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. 78 с.
20. Ребрик И.И. Наилучшие доступные технологии: планы и реальность. Концепция перехода к нормированию негативного воздействия на окружающую среду на основе

наилучших доступных технологий / И.И. Ребрик, А.Ю. Кочешков, И.А. Борисовская // ЭКО-бюллетень ИнЭкА. 2009. №3 (134).

21. Сагт Ю.Е. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Сагт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин и др. М.: Недра, 1990. 335 с.

22. Холодкевич С.В. Основные требования к организации экологического мониторинга и технологического самоконтроля на предприятиях, переходящих на систему технологического нормирования / С.В. Холодкевич // Бюллетень "Экологическая безопасность", 2002. – № 1-2 (15-16). – С. 44-49.

23. Холодкевич С.В. и др. Биоэлектронные методы биоиндикации и основные метрологические проблемы аттестации методик оценки общей токсичности поверхностных вод на их основе / С.В. Холодкевич, А.В. Иванов, Е.Л. Корниенко, А.С. Куракин, В.А. Любимцев // Мир измерений, 2011.

24. Холодкевич С.В., Шаров А.Н., Кузнецова Т.В. Перспективы и проблемы использования биоэлектронных систем в мониторинге состояния экологической безопасности акваторий Финского залива / С.В. Холодкевич, А.Н. Шаров, Т.В. Кузнецова // Региональная экология №2(37), 2015.

25. Холодкевич и др. / Оценка качества пресноводных экосистем по функциональному состоянию двустворчатых моллюсков // С.В. Холодкевич, А.Н. Шаров, Г.М. Чуйко, Т.В. Кузнецова, М.В. Гапеева, Р.А. Ложкина. Водные ресурсы, том 46, № 2, с. 214–224, 2019.

26. Храмова Н. С. Современные способы внедрения предприятиями экологически чистых технологий / Н.С. Храмова // Актуальные проблемы права: материалы V Междунар. науч. конф. (г. Москва, декабрь 2016 г.). — М.: Буки-Веди, 2016. С. 117-120.

27. Шахвердов В.А., Шахвердова М.В. Типы и факторы загрязнения восточной части Финского залива и его береговой зоны / В.А. Шахвердов, М.В. Шахвердова // Известия Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена N 176. СПб, 2015. № 176. С. 101-113.

28. Bloxham et. al. Integrated biological and chemical monitoring: In situ physiological responses of freshwater crayfish to fluctuations in environmental ammonia concentrations. M. J. Bloxham, P. J. Worsfold, M.H. Depledge *Ecotoxicology*, 1999. – №8(3). С. 225–231.

29. Depledge M.H., Aagaard A. and Gyorkos P. Assessment of trace metal toxicity using molecular, physiological and behavioural biomarkers // *Marine Pollution Bulletin*, 1995. V. 31, N 1-3, pp. 19-27.

30. Depledge M.H. et.al. Automated interpulse-duration assessment (AIDA): a new technique for detecting disturbances in cardiac activity in selected invertebrates /

- M.H. Depledge, A.K. Lundebye, T. Curtis, A. Aagaard, B.B. Andersen // *Mar. Biol.*, 1996. Vol. 126, № 2. P. 313–319.
31. Kholodkevich S.V. Experiences on ecological status assessment of the Gulf of Bothnia different sites based on cardiac activity biomarkers of caged mussels (*Mytilus edulis*) / S.V. Kholodkevich, T.V. Kuznetsova, K.K. Lehtonen, A.S. Kurakin // ICES Annual Science Conference 2011, 19-23 September, Gdansk, Poland. P. 12
32. Kuznetsova, T.V., Kholodkevich, S.V. Comparative Assessment of Surface Water Quality through Evaluation of Physiological State of Bioindicator Species: Searching a New Biomarkers / T.V. Kuznetsova, S.V. Kholodkevich // 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) . 2015. P. 339-344.
33. Kuznetsova, T. V. et.al. Experiences on ecological status assessment based on adaptive potential diagnostics in selected invertebrates of the Baltic Sea sub-regions / T.V. Kuznetsova, S.V. Kholodkevich, A.S. Kurakin // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2018. Т.11, №2.
34. Григорьев Ю.С. и др. Биологический контроль состояния окружающей среды / Ю.С. Григорьев, Н.В. Пахарькова, С.В. Прудникова, О.Е. Крючкова // Учебное пособие (конспект лекций), 2008.
35. Петин А.Н. и др. Анализ и оценка качества поверхностных вод / А.Н. Петин, М.Г. Лебедева, О.В. Крымская // Учебное пособие. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2006. – 252 с.
36. Водоканал продолжает работу по закрытию прямых выпусков сточных вод. URL: <http://www.vodokanal.spb.ru/> (дата обращения: 06.03.2018).
37. Гармонизация российского законодательства с законодательством ЕС в целях внедрения в России НДС для достижения инновационной экологической и энергетической эффективности / Гармонизация экологических стандартов II (ГЭС II) // Москва, 2009) URL: <http://ros Waste.ru/> (дата обращения: 19.04.2018).
38. Гидробиологические данные и расчетные индексы: попытки обобщений. URL: <https://studwood.ru/> (дата обращения: 19.04.2018).
39. Журнал Строительство и городское хозяйство в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. № 171 март 2017 г., с.20. URL: <http://stroypuls.ru/> (дата обращения: 15.03.2018).
40. Защита Балтийского моря. URL: <http://www.vodokanal.spb.ru/> (дата обращения: 19.03.2019).
41. Курортный р-н (Россия - Санкт-Петербург). URL: <https://www.votpusk.ru/> (дата обращения 17.03.2019).

42. Наилучшие доступные технологии. URL: <http://ecoline.ru/> (дата обращения: 10.04.2018).
43. Национальный стандарт Российской Федерации, ресурсосбережение, наилучшие доступные технологии, методология идентификации. URL: <http://docs.cntd.ru/> (дата обращения: 15.03.2018).
44. Невско-Ладожское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов. URL: <http://www.nord-west-water.ru> (дата обращения 11.04.2018).
45. Новое аппаратно-методическое обеспечение гидробионтных экспресс-биотестов / Григорьев Ю.С. // URL: [structure.sfu-kras.ru](http://structure.sfu-kras.ru) (дата обращения: 12.03.2019).
46. Российская газета. URL: <https://rg.ru> (дата обращения: 11.04.2018).
47. Северный берег Финского залива. Сестрорецк, Песочный, Зеленогорск / Несветаева И. Г., Капалыгина Т. В., Крынина Н. А. // URL: <http://www.baltfriends.ru/> (дата обращения 27.04.2019).
48. Сестрорецкий разлив. URL: <http://www.aroundspb.ru/> (дата обращения: 16.03.2019).
49. Утверждены основы государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 года. URL: <http://kremlin.ru/> (дата обращения 18.03.2019).
50. Ученые представили результаты обследования Сестрорецкого Разлива. URL: <http://www.kurort-news.ru/> (дата обращения 17.03.2019).
51. Экологический мониторинг. URL: <https://ecology-education.ru/> (дата обращения: 12.03.2019).
52. Technologies and Techniques for Early Warning Systems to Monitor and Evaluate Drinking Water Quality: State-of-the-Art Review / US Environmental Protection Agency – Office of Water – Office of Science and Technology – Health and Ecological Criteria Division. – 2005. – December // URL: <https://nepis.epa.gov/> (дата обращения 17.03.2019).