

Санкт-Петербургский государственный университет

КАЛИНИНА Анна Андреевна

Выпускная квалификационная работа

***Оценка здоровья экосистем акваторий реки Камы (в районе г. Набережные Челны)
с разным уровнем антропогенной нагрузки***

Уровень образования: *Магистратура*

Направление *05.04.06 «Экология и природопользование»*

Основная образовательная программа *ВМ 5797 «Геоэкология: мониторинг,
природопользование и экологическая безопасность»*

Научный руководитель:

Профессор кафедры экологической безопасности
и устойчивого развития регионов,
Институт наук о Земле, д.т.н.,
профессор Холодкевич Сергей Викторович

Рецензент:

Ведущий научный сотрудник
лаборатории биоэлектронных методов
геоэкологического мониторинга,
д.б.н., Шаров Андрей Николаевич

Санкт-Петербург
2022

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Глоссарий | 3 |
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ..... | 6 |
| 1.1 Здоровье экосистем | 6 |
| 1.2 Виды биоиндикаторов..... | 7 |
| 1.3 Мониторинг на основе поведенческих характеристик животных..... | 10 |
| 1.4 Мониторинг вод с использованием морских и пресноводных моллюсков | 10 |
| 1.5 Биоэлектронная система мониторинга..... | 11 |
| ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ..... | 14 |
| ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ..... | 17 |
| 3.1 Физико-географическая характеристика бассейна реки Кама..... | 17 |
| 3.2 Состояние реки Кама | 19 |
| 3.3 Характеристика выбранных станций отлова моллюсков | 20 |
| 3.4 Индекс состояния (Condition Index)..... | 25 |
| 3.5 Результаты лабораторного исследования | 27 |
| 3.6 Индексы МРІ и ВСF | 30 |
| 3.7 Результаты тестирования адаптивной способности моллюсков | 32 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 43 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 44 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 47 |
| <i>Приложение №1 статистическая обработка полученных результатов</i> | <i>47</i> |

Глоссарий

СРБП - Системы раннего биологического предупреждения

ЕНА – Ecosystem Health Assessment/ Оценка здоровья экосистемы

Vogesella indigofera – Аэробные, грамотрицательные бактерии

Phacus Tortus – Водоросли отдела *Euglenozoa*

Euglena clastica – Эвглена

Agrostis spp. – Полевица

Anthroxanthum spp. – Душистый колосок

Festuca spp. – Овсяница

Papaver macrostomum – Мак крупноротый

Mytilus spp. – Мидии

ISO – Международная организация по стандартизации/Международный стандарт

СИАК – Специализированная инспекция аналитического контроля

ПДК_{р.х} – Предельно допустимые концентрации для рыбохозяйственных водоемов

УКИЗВ – Удельная величина комбинаторного индекса загрязненности воды

ПДК – Предельно допустимые концентрации

Unio pictorum – Перловица обыкновенная

ЛВ – Ливневые воды

On-line – Режим реального времени

T_{восст} – Время восстановления после гипоосмотического воздействия на тест организм

ЧСС – Частота сердечных сокращений

CI – Condition Index/ Индекс состояния

MPI – Metal pollution Index / Индекс загрязнения металлами

BCF – Bioconcentration factor / Фактор биоконцентрации

СКО – Среднеквадратическое отклонение

ЕВРД – Европейской Водной Рамочной Директивой

EQR – (Ecological Quality Ratio)/ Коэффициент экологического качества

ВВЕДЕНИЕ

Биоиндикаторы играют важную роль в современном биомониторинге состояния природной водной среды. Их использование позволяет прямо или косвенно оценивать биологические эффекты загрязняющих веществ, поступающих в экосистему. Они быстро реагируют на воздействие химических и физических факторов, что можно использовать для создания систем раннего биологического предупреждения (СРБП) (Pattanayak и др., 2020). Привлечение внимания к реакциям организмов, чувствительных к изменениям, и их использование для контроля качества окружающей среды открыло новые возможности для развития научного направления, известной в литературе, как биоиндикация. Биоиндикация предполагает использование знаний несколько научных дисциплин, включая биологию, географию в широком смысле и химию. Таким образом, она объединяет в понятной форме измерения, полученные с помощью инструментов физико-химического анализа (результаты химического анализа), и оценки воздействия этих химических загрязнений на водные организмы-биоиндикаторы, переводя эти параметры в биохимические, физиологические и морфологические изменения у биоиндикаторов (Józwiak, 2014). Оценка состояния биоиндикаторов косвенно обеспечивает оценку естественного состояния или уровня/степени загрязнения, присутствующего в данной конкретной экосистеме (Manickavasagam и др., 2019).

В настоящее время набирают популярность системы раннего биологического предупреждения (СРБП), которые могут обнаруживать опасные загрязнения, например, воды источника питьевого водоснабжения до ее поступления в систему водозабора водопроводной станции. Непрерывный мониторинг в режиме реального времени можно использовать не только для выявления откликов намного быстрее, чем стандартные 24-часовые тесты на острую токсичность, но также для непрерывного мониторинга сточных вод. В данной работе использовался один из методов биомониторинга – биоэлектронный подход, который был разработан в НИЦЭБ РАН под руководством Холодкевича С. В.

Цель выпускной квалификационной работы – провести сравнительную биоэлектронную диагностику экологического состояния (здоровья) экосистем акваторий реки Кама (в районе г. Набережные Челны) с различной антропогенной нагрузкой, на основе оценок адаптивной способности (здоровья) обитающих в них моллюсков.

Задачи:

1. Оценить степень загрязнения реки Камы на основе литературных данных.
2. Провести сравнительную оценку уровней загрязнения выбранных акваторий по загрязненности донных отложений и тканей местных видов моллюсков-фильтраторов тяжелыми металлами.
3. Провести натурные эксперименты с использованием выбранной методики тестирования адаптивного состояния (здоровья) моллюсков, обитающих в исследованных участках акватории р. Кама.
4. Провести сравнительные оценки экологического состояния (здоровья) выбранных акваторий реки Камы вдоль побережья г. Набережные Челны по результатам тестирования здоровья обитающих в них моллюсков *Unio pictorum*.

Объект исследования: акватории реки Кама в черте г. Набережные Челны.

Предмет исследования: сравнительная оценка различий адаптивных возможностей местных моллюсков *Unio pictorum* с использованием биоэлектронной системы контроля их кардиоактивности.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Здоровье экосистем

Основы концепции здоровья экосистем были заложены еще в 18 веке идеями шотландского геолога Джеймса Хаттона, который начал описывать Землю как интегрированную систему. Работы Альдо Леопольда заложили первый фундамент концепции здоровья экосистемы. С тех пор определение здоровья экосистемы постоянно эволюционировало в сторону интеграции все большего числа связей человека и природы, чтобы понять, что считается здоровой экосистемой. Здоровье экосистемы можно понимать как концепцию управления, которая способствует решению экологических проблем. В Соединенных Штатах и Канаде концепция здоровья экосистем была принята на законодательном уровне и является частью международных политических программ, например, так называемой Рио-де-Жанейрской конвенции об устойчивом развитии. Таким образом, оценка здоровья экосистемы не только принимает во внимание экологические компоненты, но также требует понимания социальных, экономических и культурных аспектов. Следовательно его определение является более всеобъемлющим, чем определение здоровья человека. Эти факты должны быть отражены при определении соответствующих наборов индикаторов, которые могут применяться в рамках соответствующих оценок здоровья экосистемы. Индикаторы должны соответствовать различным научным и практическим требованиям (например, четкая взаимосвязь между индикатором и предметом, который должен быть указан, измеримость и доступность данных). Выбор и применение индикаторов определяют результаты количественной оценки состояния экосистемы и оказывают большое влияние на цели управления и их успех (Burkhard и др., 2008).

Идея оценки здоровья экосистемы (ЕНА) была сформулирована в конце 1980-х годов, когда появилось все больше публикаций по этой теме. С тех пор прошли широкие дискуссии об адекватных концепциях и методологиях. Поскольку отдельные экосистемы никогда не идентичны по основным характеристикам (например, лесная экосистема и экосистема водно-болотных угодий), сложно найти общие и воспроизводимые подходы вместо конкретных методов. Определение целей управления природными комплексами и их индикаторов - еще одна проблема при оценке состояния экосистемы.

Поскольку здоровье экосистемы, в виду ее сложности, невозможно измерить или наблюдать напрямую, для его оценки необходимо применять другие меры (индикаторы).

Экосистемы чрезвычайно сложны, поэтому ни один индикатор не может быть полностью репрезентативным в отношении всех возможных требований, характеристик и условий. Тем не менее, существует широкий спектр индикаторов, которые можно использовать для оценки здоровья экосистемы. Их можно разделить на разные категории, которые включают разные уровни интеграции: от довольно редуционистских до целостных показателей, объединяющих широкий спектр экологической информации:

- Индикаторы, основанные на численности отобранных видов;
- Индикаторы, основанные на концентрации выбранных элементов;
- Индикаторы, основанные на соотношениях между различными классами организмов элементов;
- Индикаторы, основанные на экологических стратегиях или процессах;
- Индикаторы, основанные на составе и структуре экосистемы;
- Системные теоретические целостные индикаторы.

Определение соответствующих отношений индикатор-индикатор (феномен, который необходимо оценить) должно выполняться тщательно, особенно при работе с целостными и сильно агрегированными индикаторами.

Эти показатели должны быть подкреплены экологическими принципами и теорией систем. Они должны подходить для приложений в различных временных и пространственных масштабах. Параметры, необходимые для их количественной оценки, должны быть доступными и воспроизводимыми в рамках экологических оценок. Более того, индикаторы должны давать адекватную информацию о тенденциях качества экосистем, полезную для менеджеров и ученых, которая учитывает сложные причинно-следственные цепочки в системах человек-окружающая среда. Для оценки состояния экосистемы с учетом экономических и социальных аспектов, региональных и глобальных изменений окружающей среды, а также изменений в предоставлении экосистемных услуг и их последствий для благосостояния людей необходимо интегрировать различные ценности и процессы (Burkhard и др., 2008).

1.2 Виды биоиндикаторов

1. Микробный биоиндикатор

Микроорганизмы составляют большую часть водной биомассы. Скорость размножения также высока, и они доступнее, чем макроорганизмы. Микробные биоиндикаторы можно отнести к микроорганизмам, которые используются для индикации здоровья и наземной, и водной экосистем. Эти микроорганизмы очень чувствительны к небольшим концентрациям токсичных веществ и загрязнителей, с помощью которых они могут реагировать на изменения качества экосистемы (Hosmani, 1966).

Раннее предупреждение наблюдается благодаря стрессовому белку, секретируемому микроорганизмами, когда они подвергаются воздействию загрязняющих веществ, например, содержащих бензол и кадмий. Билюминесцентные бактерии можно использовать в качестве индикатора для установления уровня токсинов. При высоком уровне токсина наблюдается нарушение клеточного метаболизма, из-за которого снижается световая эмиссия этих бактерий. Сообщалось, что *Vogesella indigofera* может производить синие пигменты в отсутствие каких-либо металлов, в то время как пигментация блокируется из-за присутствия шестивалентного хрома (Arora, 1966).

2. Растения-биоиндикаторы

Рост промышленности и населения прямо или косвенно играет важную роль в загрязнении окружающей среды. Известно, что некоторые виды растений, в основном морские, в большей степени могут понижать уровень загрязнения. Эти морские растения (макрофиты) неподвижны в природе. Лишайники, мутуализм между водорослями и грибами, в основном растут на стволах лесных растений. Даже легкое изменение качества воздуха, климата и структуры леса можно узнать по реакции лишайников. Иногда лишайники исчезают из лесной экосистемы из-за стресса окружающей среды, например, из-за повышения содержания в воздушной среде токсичных газов. Фитопланктон *Phacus Tortus*, *Euglena clastica* используются в качестве индикатора загрязнения морской экосистемы. Высшие растения, такие как *Agrostis spp.*, *Anthroxanthum spp.*, *Festuca spp.* как известно, являются индикаторами для меди, цинка и свинца соответственно. Точно так же низшие растения, такие как лишайники, могут указывать на наличие диоксида серы и фтора, газообразного озона, радионуклидов, таких как цезий-137, стронций-90 и т.д. (Pattanayak, 2020).

3. Морфологический и физиологический ответ растений на загрязнение окружающей среды

Основные видимые морфологические и физиологические изменения могут наблюдаться из-за нескольких нарушений в окружающей среде. Эти видимые изменения происходят из-за непереносимости растения условий окружающей среды. Преждевременная потеря листьев может наблюдаться из-за загрязнения воздуха, например, двуокиси серы и пыли цементных печей. Сообщалось о нерегулярном формировании листьев и цветов из-за большого количества радионуклидов в почве (Osborn, 1961). Из-за высокого содержания свинца в почве наблюдали неправильное формирование лепестков у *Papaver macrostomum* и карликовость у хвойных растений. Некоторые биотические и абиотические факторы прямо или косвенно влияют на ширину годичных колец или древесную биомассу. Длительное воздействие диоксида серы и

тяжелых металлов может приводить к уменьшению ширины кольца. Воздействие высоких концентраций озона и углеводородов может вызвать хлороз *Сосны обыкновенной* и *Ели обыкновенной*.

4. Животные-биоиндикаторы

Животные играют важную роль в качестве биоиндикатора, реагируя на загрязненную среду несколькими способами. Изменения в окружающей среде напрямую влияют на плотность популяции животных и нарушают пищевую цепочку. Например, лягушки являются основными биоиндикаторами любых изменений водной и наземной среды. Беспозвоночные, живущие в нижнем слое водной среды, являются наиболее подходящими потенциальными индикаторами, влияющими на качество водного объекта. Мидия широко используется для выявления загрязнения прибрежных морских акваторий любыми металлами. Их высокая доступность и широкая распространённость сделали их хорошим биоиндикатором для проведения экологического мониторинга.

Другими хорошими биоиндикаторами являются дождевые черви, которые, например, указывают на высокое радиоактивное загрязнение почвы, а морские животные определяют здоровье водоема. Плотности данных популяций животных-биоиндикаторов увеличиваются или уменьшаются в ответ на изменение окружающей среды. Токсичные химические вещества напрямую влияют на ткани животных. Физиологические, морфологические и поведенческие изменения также определяют качество окружающей среды (Khatri, Tyagi, 2015).

5. Планктоны-биоиндикаторы

Планктон играет решающую роль в мониторинге загрязнения водоемов, в основном озер. Их можно назвать лучшими маркерами для определения здоровья водных экосистем. Планктон не только является индикатором здоровья водных экосистем, но и является основным источником существования для многих более крупных организмов в водных объектах. Таким образом, планктон является ключевым индикатором качества воды и основным источником пищи для многих рыб.

Некоторые виды планктона, такие как цианобактерии, производят токсины, которые смешиваются с водой и ухудшают ее качество.

- Фитопланктон. Фитопланктон – это водное растение, которое посредством фотосинтеза производит биомассу, являющуюся важнейшим продуктом питания многих видов животных. Они также известны как микроводоросли и встречаются в основном как свободно плавающие в воде акваторий. Количество солнечного света играет решающую роль в их жизни, поэтому показатель, их численности снижается в водоемах, загрязненных веществами, влияющими проникновение солнечного

света. Кроме того, уменьшение количества солнечного света может напрямую влиять на поглощение аммиака и нитратов фитопланктоном (Walsh, 1978).

- Зоопланктон. Они, как и фитопланктон «парят» и передвигаются только с потоками воды. Фитопланктон и бактериопланктон – основная пища зоопланктона. Они помогают определять качество воды. В дополнении к этому они могут предупредить о процессе эвтрофикации. Численность зоопланктона зависит от многих абиотических факторов, таких как температура, стратификация и биотические факторы, такие как хищничество, конкуренция за свой рост и развитие.

1.3 Мониторинг на основе поведенческих характеристик животных

В начале 1900-х годов исследования поведения водных организмов были в основном сосредоточены на жизнедеятельности организмов. Впервые Humboldt и Provençal исследовали дыхание рыб (Humboldt, Provençal, 1809). Они помещали рыбу в колбу, наполненную водой, а затем, через определенный промежуток времени, отбиралась вода в колбе для измерения изменений состава газов из-за поглощения и выделения. Позднее аналогичные методы были применены к морским беспозвоночным. Кроме того, непосредственно наблюдались изменения в оперкулярных показателях рыб для изучения влияния изменений окружающей среды и различных токсикантов. Газообмен водных организмов измеряли путем мониторинга изменений газосодержания в закрытом сосуде с водой, содержащим различные организмы, такие как рыбы и мидии. Газообмен водных организмов также измеряли в проточных водных системах. Принцип Рено, который гласит, что можно определить природу катаболизируемых веществ, используя коэффициент дыхания, также применяется для измерения дыхательной активности водных организмов. Также было предложено устройство, которое могло записывать ритмы суточной активности, был также предложен – ихтиометр. Кроме того, несколько исследований были сосредоточены на определении основных факторов, влияющих на поведение рыб в стае; тестируемые параметры включали зрение рыб, характерное движение и химическая чувствительность. Также были рассмотрены различные факторы окружающей среды, чтобы объяснить поведение при обучении рыб, включая корм, температуру, и хлорированную воду и pH (Regnault, Reiset, 1849).

1.4 Мониторинг вод с использованием морских и пресноводных моллюсков

Было замечено, что океаны и моря с высокой плотностью населения в береговой зоне подвергаются многочисленным антропогенным воздействиям, в том числе химическому загрязнению тяжелыми металлами. Эти загрязнители, поступающие в

результате нашей антропогенной деятельности, переносятся реками или атмосферным воздухом и накапливаются в морях и океанах, где они, в основном, затрагивают прибрежные районы. В 70-е годы было предложено использовать организмы, в частности мидий рода *Mytilus*, в качестве биоиндикатора, чтобы оценивать состояние химического загрязнения прибрежных экосистем. Мидии, подобные роду *Mytilus*, широко используются в качестве наиболее подходящих биологических индикаторов загрязнения, поскольку они обладают множеством полезных для этой цели характеристик: оседлые фильтраторы, накапливающие загрязняющие вещества в своих тканях; проявляют низкую способность метаболизировать органические загрязнители; имеют стабильную местную популяцию во многих местах; и имеют в наличии широкий спектр чувствительных реакций на организменном, тканевом и клеточном уровнях, которые могут использоваться в качестве биомаркеров. Концентрации тяжелых металлов в *Mytilus spp.* отражают концентрации прибрежных вод, в которых они обитают. Поскольку это живые организмы, на поглощение и биоаккумуляцию металлов может также влиять ряд биотических и абиотических факторов, таких как размер тела, расположение в приливной зоне, время сбора, температура, соленость и pH (Azizi и др., 2018). Известно, что человечество заинтересовано в отслеживании состояния и тенденций изменения окружающей среды. Каждая среда обитания человека включает физические, химические и биологические факторы, а также социальные, культурные и политические элементы. Здоровая окружающая среда - та, которая обеспечивает питание и является устойчивой - способствует здоровому обществу, которое может процветать, является справедливым и сохраняет другие формы жизни. Более того, распознавание и мониторинг поучительных индикаторов здоровой окружающей среды позволяет обществу выгодно управлять собой и окружающей средой. Можно сказать, что индикаторы экологического здоровья – это признаки и симптомы, отражающие здоровье экосистем, в которых живут человеческие сообщества и от которых они зависят (Angermeier, Karr, 2019).

1.5 Биоэлектронная система мониторинга

Двустворчатые моллюски - предпочтительный вид биоиндикаторов, потому что они обладают некоторыми особенностями, которые делают их подходящими для этой цели. Среди указанных особенностей: широкое распространение, простота отбора проб, высокая численность, низкая мобильность, а также экологическая и экономическая значимость. Также была установлена чувствительность этих моллюсков к загрязнителям, а также их способность накапливать их (Luna-Acosta и др., 2012). Использование двустворчатых моллюсков в качестве тест-организмов оптимально для оценок здоровья водных экосистем. Это обусловлено тем, что данные животные чувствительны к

изменению физико-химических факторов своей среды обитания; являются относительно долгоживущими; широко распространены в водных системах; достаточно хорошо изучены с точки зрения особенностей функционирования их жизнеобеспечивающих систем; имеют низкую локомоторную активность; удобны для применения используемых экофизиологических методов оценки содержания фенольных соединений как в организмах отдельных особей, так и на уровне популяции в целом (по выборке её представителей). Последнее обеспечивается именно наличием у макробентосных беспозвоночных жёсткого наружного покрова, который позволяет без стрессирования животных на длительное время закреплять на них необходимые миниатюрные измерительные датчики (Холодкевич и др., 2011).

В настоящей работе предполагается использовать биоэлектронный метод. Биоэлектронные системы – это 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 (Холодкевич и др., 2018). Следует отметить, что на основе биоэлектронных систем можно развивать как пассивные, так и активные методы биоиндикации. В первом случае проводятся непрерывные измерения и анализ в реальном времени динамики изменения поведенческих и/или физиологических биомаркеров референтных тест-организмов, свободно живущих в исследуемой природной водной среде. Таким образом регистрируются отклонения от нормы в состоянии животных, являющиеся признаками оказания на них стрессового воздействия, обусловленного острой токсичностью среды обитания.

Во втором случае оценка экологического статуса акватории производится на основе поиска и изучения отклонения от нормы реакции животных из природной микропопуляции исследуемой акватории на стандартизованные тест-воздействия, т.е. на функциональные нагрузки, вызывающие непродолжительное стрессовое воздействие на тест-организм, находящийся в условиях своего обитания в природе или близких к ним. Живые организмы уже долгое время используются как биосенсоры. Международная организация по стандартизации (ISO) одобрила список биосенсорных организмов и тестовых реакций, в котором двустворчатые моллюски занимают важное место. Это обусловлено тем, что моллюски обладают высокой чувствительностью и относительно быстро отвечают на загрязнение, защищаясь створками своих раковин от внешних воздействий, поэтому изменение поведенческой активности этих животных используется для оценки состояния среды их обитания.

Биоэлектронные системы пассивного биомониторинга имеют широкие перспективы применения в следующих областях:

- контроль качества воды на станциях питьевого водоснабжения;
- контроль качества очищенных сточных вод как среды обитания гидробионтов;
- аквакультура;
- экологический мониторинг поверхностных вод и донных отложений, в том числе районов глубоководных нефтяных и газовых месторождений на шельфе (Холодкевич и др., 2011).

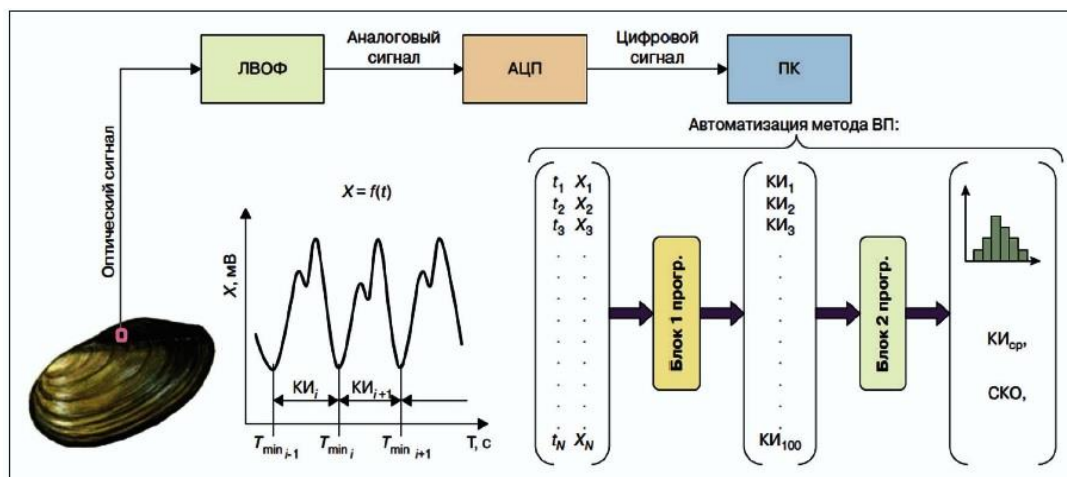
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения процедуры тестирования здоровья пресноводных двустворчатых моллюсков после отлова их помещают в ёмкости с принудительной аэрацией. С каждой станции необходимо отбирать не менее 20 моллюсков (в настоящей работе отбирались широко распространенные в Российских реках и озерах моллюски рода *Unio pictorum*).

Частота сердечных сокращений (ЧСС) моллюсков измерялась с помощью биоэлектронной волоконно-оптической системы БиоАргус (полученной на время проведения измерений в РЦ «Обсерватория экологической безопасности» СПбГУ), в которой частота сердечных сокращений (ЧСС) животных с жестким наружным покровом регистрируется без его нарушения – неинвазивно. При этом система БиоАргус позволяет в реальном времени измерять и архивировать ЧСС одновременно 8 животных-биоиндикаторов (в нашей работе – моллюсков *Unio pictorum*). Обычно, для статистической достоверности, одновременно измеряют кардиоритм от 8 до 16 бентосных беспозвоночных.

Регистрация кардиоритма проводится с помощью лазерного волоконно-оптического фотоплетизмографа, откуда формируемый инфракрасный луч полупроводникового лазера при помощи оптического волокна подается с внешней стороны раковины (без ее нарушения) к области пульсирующего сердца тест-организма. Луч, проходя через створку раковины моллюска, отражается от пульсирующего сердца и далее выходя обратно наружу через раковину с помощью второго оптического волокна содержащий информацию о периодических изменениях объема сердца, направляется на фотоприемник, расположенный в фотоплетизмографе, где преобразуется в аналоговый сигнал, содержащий информацию о частоте сердечных сокращений (ЧСС), который затем через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) поступает в персональный компьютер для архивации и анализа с помощью оригинальной программы VarPulse (Холодкевич и др., 2018)

Схема экспериментальной установки и системы автоматической обработки данных для анализа сердечной деятельности моллюсков представлена на рисунке 1.



Блок-схема установки и автоматической обработки хронотропных параметров сердечного ритма моллюска: ЛВОФ — лазерный волоконно-оптический фотоплетизмограф; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ПК — персональный компьютер. Представлены основные этапы математической обработки выборки кардиоинтервалов (не менее 50): средняя величина кардиоинтервалов ($КИ_{ср}$), среднее квадратичное отклонение (СКО)

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки и системы автоматической обработки данных для анализа сердечной деятельности моллюсков (Холодкевич и др., 2015).

Через несколько часов после того, как у отобранных животных-биоиндикаторов стабилизируется и сохраняется в течение двух часов определенный кардиоритм, осуществляется быстрое (в течение 2–3 мин) снижение (для морских акваторий) или повышение (для пресноводных акваторий) солёности воды путём добавления в аквариум необходимого количества, соответственно, дистиллированной или солёной воды на один час. Для проверки функционального состояния живых организмов анализируется адаптивная перестройка сердечного ритма после восстановления первоначального показателя солёности воды (Kholodkevich и др., 2020; Холодкевич и др., 2018).

Оценка функционального состояния проводится на основе измерения времени адаптивного восстановления ЧСС ($T_{восст}$) до фонового уровня после снятия непродолжительной функциональной нагрузки (рис. 2), то есть промежутка времени после восстановления исходной солёности воды и до начала стабилизации ЧСС до фоновых значений, наблюдавшихся до изменения солёности воды (Холодкевич и др., 2018).

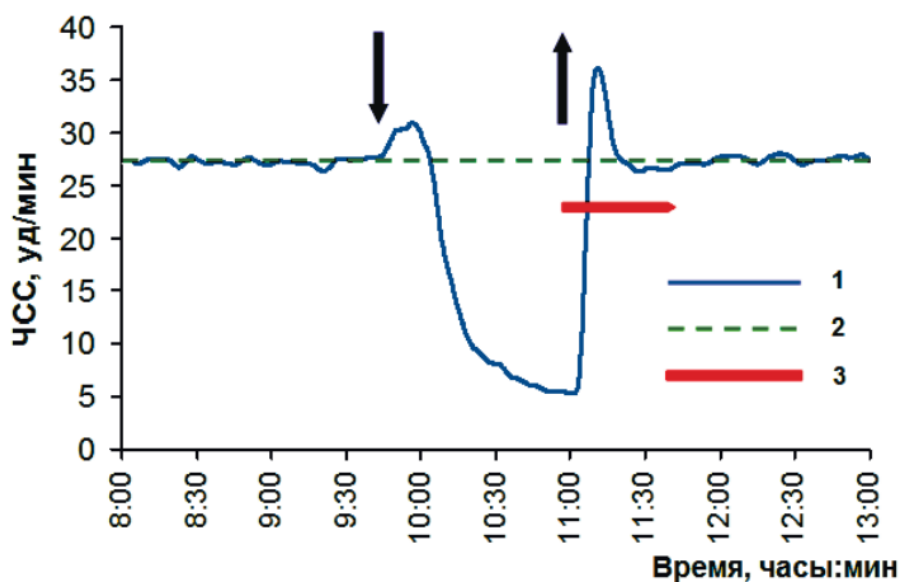


Рисунок 2 – Изменение ЧСС в процессе тестирования на основе гипоосмотического стресс-воздействия (1 — тренд средней ЧСС до, во время воздействия и после восстановления первоначальной солёности воды; 2 — среднее значение ЧСС по группе мидий в спокойном, фоновом, состоянии; 3 — время восстановления фоновой ЧСС после возвращения к исходной солёности воды). Стрелки указывают на время начала изменения солёности (стрелка вниз) и начала восстановления первоначальной солёности воды (стрелка вверх) (Холодкевич и др., 2018)

Как показывали многочисленные опыты, моллюски из чистых референтных акваторий, отличаются от гидробионтов из загрязнённых зон тем, что они демонстрируют более высокую адаптивную способность, которая выражается в значительно более коротком времени восстановления значений ЧСС). Так, было обнаружено, что время восстановления ЧСС моллюсков из условно чистых мест составляет 30–50 минут, а из загрязнённых может достигать нескольких часов (Холодкевич и др., 2018).

Статистическую обработку результатов проводили при помощи программы Statistica 12 (StatSoft, США). Результаты представлены в виде количества наблюдений (N), среднего, минимума и максимума, стандартного отклонения.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Физико-географическая характеристика бассейна реки Кама

Река Кама – это крупнейший приток Волги и протекает в основном по долине между возвышенностями Высокого Заволжья. Бассейн реки простирается от таежной до лесостепной зоны. Длина Камы 1805 км (в пределах Республики Татарстан 360 км), площадь водосборного бассейна более 507 тыс. км² (в пределах Республики Татарстан 38 тыс. км²), питание преимущественно снеговое, а также подземное и дождевое (Eds и др., 2009). В пределах бассейна р. Кама находится 11 субъектов РФ (рисунок 3). Река подвержена загрязнению промышленными сточными водами.

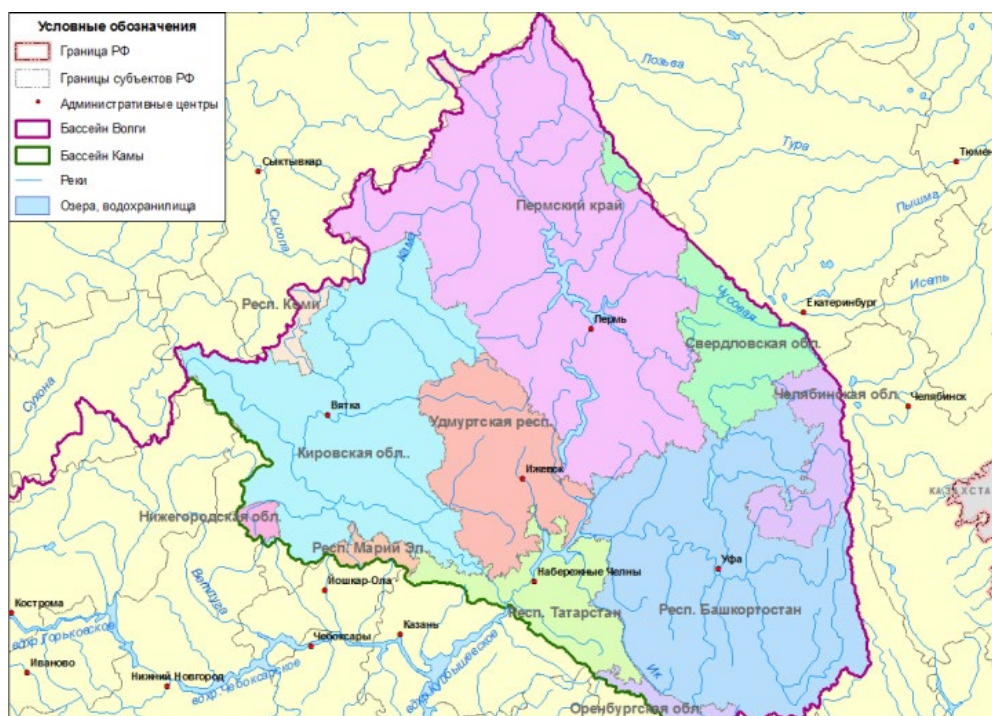


Рисунок 3 – Административно-территориальное деление бассейна Камы (масштаб 1:5100000) (Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы, 2015).

На Каме создано три крупных водохранилища речного типа, которые различаются по морфометрическим показателям (таблица 1).

Таблица 1 – Морфометрические характеристики водохранилищ р. Камы (Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы, 2015).

| Показатель | Камское | Воткинское | Нижнекамское | Куйбышевское камская ветвь |
|---|---------|------------|--------------|----------------------------|
| Годы заполнения | 1954 | 1964 | 1979 | 1955–1957 |
| Площадь акватории, км ² | 1910 | 1120 | 1080 | 1397 |
| Площадь мелководий, % | 19,4 | 11,3 | 49,8 | – |
| Объем, км ³ | 12,2 | 9,4 | 2,9 | 6,6 |
| Длина, км | 300 | 365 | 185 | 265 |
| Максимальная глубина, м | 30 | 28 | 20 | - |
| Средняя глубина, м | 6,3 | 8,4 | 3,3 | 5,5 |
| Коэффициент водообмена, год ⁻¹ | 4,2 | 5,8 | 6,8 | 4,1 |

Водоохранилища характеризуются интенсивным водообменом, Камское и Воткинское – сезонным, а Нижнекамское – недельно-суточным регулированием стока. Нижнекамское водохранилище расположено на территории таких республик как Башкортостан, Удмуртия и Татарстан. Около половины площади водохранилища занимают мелководья с глубинами до 2 м. Нижняя часть каскада относится к Куйбышевскому водохранилищу.

Бассейн Камы, на территории республики Татарстан, располагается в зоне умеренно континентального климата. Средняя температура в январе колеблется в пределах от -13 до -15 °С. Зима длинная, холодная, с устойчивым снежным покровом. Годовая амплитуда температур (разность между средней месячной температурой самого теплого и холодного месяцев) в этом районе составляет 30–35 °С.

По степени увлажнения бассейн Камы относится к зоне достаточного увлажнения – количество осадков превышает испарение. В верховьях Камы годовая сумма осадков составляет 700–800 мм/год. Меньше всего выпадает осадков в феврале – апреле. Всего с

ноября по март на севере бассейна в среднем выпадает от 150 до 200 мм, в нижнем течении – 100– 150 мм, местами менее 100 мм.

Появление снежного покрова в бассейне Камы наблюдается в основном в середине и конце октября. Устойчивый снежный покров образуется в среднем на три недели позже, в конце октября – первой половине ноября, а разрушается в основном в середине апреля, на северо-востоке – в конце апреля (Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы, 2015).

В нижнем течении реки почвы серые лесные. В среднем и нижнем течениях р. Кама территория бассейна покрыта широколиственно-темнохвойными приволжскими елово-пихтовыми с черешчатым дубом и липой лесами, широколиственными восточноевропейскими дубовыми лесами. На юге луговые степи и остепнённые луга (лесостепь) заволжские с дубовыми лесами (Беляева и др., 2018).

Река Кама является основным источником водохозяйственного снабжения для Татарстана, в том числе и для г. Набережные Челны. В своем течении по территории республики имеет наибольшую протяженность – 360 км. Водность составляет – 3800 куб.м./сек. Левый приток Камы – река Челнинка длиной 30,8 км, располагается вблизи населенных пунктов Орловка и Сидоровка, входящих в состав г. Набережные Челны. По территории города протекает река Мелекеска, которая впадает в реку Челнинку в 1 км от устья, сейчас устья обеих речек практически образовали залив Нижнекамского водохранилища (Государственного доклад «О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2020 году», 2021). Река Шильна является левым притоком Камы, протекает по линии городского округа г. Набережные Челны на Север по направлению посёлка Малая Шильна и огибает на Запад к истоку.

3.2 Состояние реки Кама

В 2020 г. Прикамской СИАК Министерства осуществлялся мониторинг за гидрохимическим состоянием 9 рек на 12 пунктах наблюдения. Было отобрано 184 пробы природной воды и выполнено 3473 анализа, зафиксировано 332 превышения ПДКр.х. загрязняющих веществ против 385 превышений ПДКр.х. в 2019 г. Превышения ПДКр.х. в природных водах региона отмечались по 9 показателям химического состава. Основную долю в загрязнение поверхностных вод вносили марганец, медь, железо.

Водородный показатель р. Кама в районе г. Набережные Челны колеблется в районе 7,8-8,2. Кислотность воды характеризуется как слабощелочная (Все реки. Информационный сайт о реках России. URL: <http://vsereki.ru/reki-vnutrennego-stoka/bassejn-kaspijskogo-morya/volga/kama>).

Превышения ПДКр.х. в природных водах р.Кама с.Белоус отмечались по 4 показателям химического состава: марганец – 9 превышений, медь – 8 превышений, железо – 7 превышений, БПК5 – 1 превышение. Среднегодовая и максимальная концентрации составили: марганца – 2,9 и 7,7 ПДКр.х., меди – 2,1 и 3,9 ПДКр.х., железа – 1,9 и 7,6 ПДКр.х., БПК5 – 0,76 и 1,25 ПДКр.х.

Превышения ПДКр.х. в природных водах р.Кама с.Бетьки отмечались по 3 показателям химического состава: медь – 8 превышений, марганец – 7 превышений, железо – 6 превышений. Среднегодовая и максимальная концентрации составили: марганца – 2 и 4,5 ПДКр.х., меди – 2 и 4 ПДКр.х., железа – 1,5 и 3,4 ПДКр.х.

В пункте наблюдений г. Набережные Челны класс качества воды характеризуется как 3 а «загрязненная». Превышения ПДК зафиксированы по 6 ингредиентам химического состава воды. Наибольшую долю в общую оценку степени загрязненности воды вносили трудноокисляемые соединения по ХПК, соединения железа общего, меди, марганца, а также фенолы летучие. Среднегодовое содержание сульфатных ионов составляло 0,7 ПДК, (максимальное – 1,0 ПДК), трудноокисляемых соединений по ХПК – 1,6 ПДК (максимальное – 2,1 ПДК), соединений железа – 1,5 ПДК (максимальное – 4,9 ПДК), меди – 2,7 ПДК (максимальное – 5,4 ПДК), марганца – 2,3 ПДК (максимальное – 6,7 ПДК), алюминия – 1,4 ПДК (максимальное – 8,9 ПДК), фенолов летучих – 1,6 ПДК (максимальное – 2,8 ПДК) (Государственного доклад «О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2020 году», 2022).

3.3 Характеристика выбранных станций отлова моллюсков

Отлов моллюсков проходил из реки Кама на глубине 0,3 – 0,7 м. Было выбрано 5 акваторий с разной антропогенной нагрузкой, где отбирались животные (рисунок 4). В общей сложности было отобрано 80 животных рода *Unio pictorum* со схожими морфологическими признаками. Данный вид широко распространён на территории Республики Татарстан.

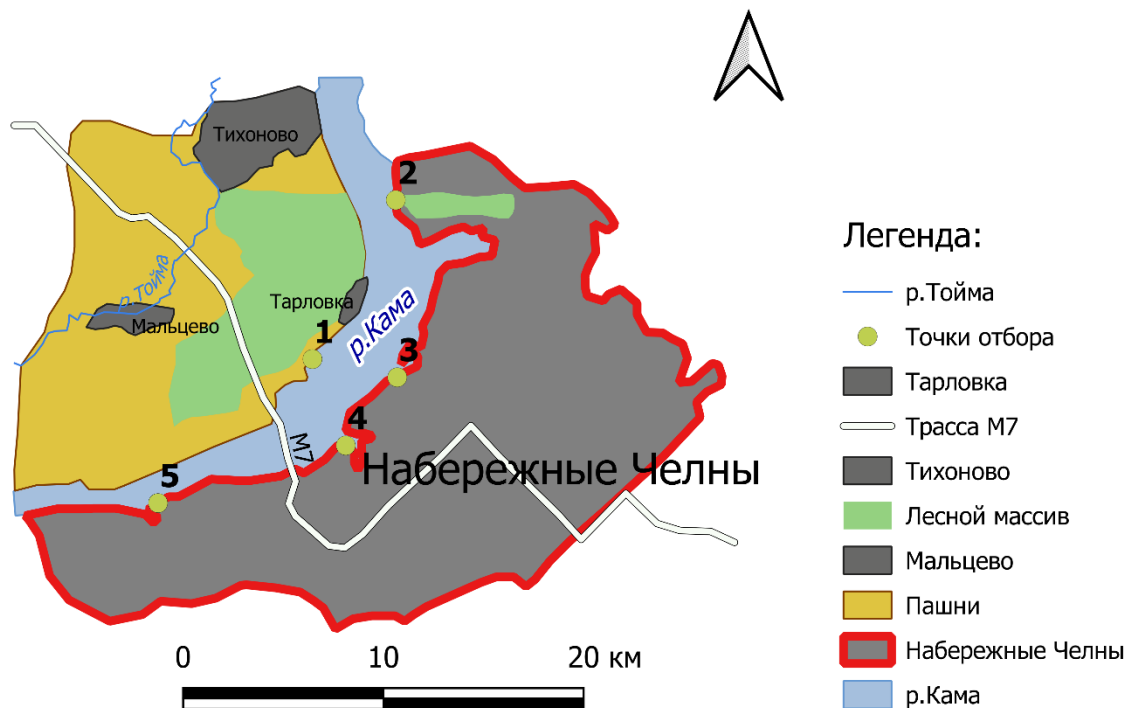


Рисунок 4 – Карта-схема расположения станций отбора моллюсков

Первая станция – участок, который располагается на правом берегу р. Кама. На данной территории идёт строительство нового коттеджного посёлка. В самом посёлке Тарловка проживает около 100 человек. Сама территория примечательна живописными местами, которые являются курортной зоной. Координаты места: 55°45'1" с.ш. 59°19'20" в.д. (рисунок 5).

Вторая станция – место в начале города, выбрано для того, чтобы посмотреть вода какого качества поступает в город. В окрестностях располагается множество баз отдыха, многие из которых в настоящее время заброшены. Выше по течению находится нефтеперерабатывающий завод «Татнефть». Координаты места: 55°51'38" с.ш. 59°32'2" в.д. (рисунок 6).

Третья станция – точка расположения неподалёку от места сброса ливневых вод центральной части г. Naberezhnye Chelny в р. Кама. Сброс происходит под набережной Табеева, которая располагается в районе парка «Прибрежный». Координаты места: 55°45'1" с.ш. 52°22'5" в.д. 55°42'7" с.ш. 52°19'6" в.д. (рисунок 7).

Четвёртая станция – городской пляж, который находится на набережной им. Г. Тукая. В городе только два городских пляжа на которых купание разрешено. Этот пляж считается новым и хорошо оборудованным. Был установлен спасательный пост, дно водоёма было очищено и место разрешенного купания было огорожены буйками. Сам пляж был засыпан песком, что привлекает местным жителей. Здесь находятся площадки

для волейбола и баскетбола. Также, здесь установлены точки общепита, батуты и т.п. В летнее время – это популярное место для купания, в выходные пляж посещает примерно 150-200 человек. Координаты места: 55°42'7" с.ш. 52°19'6" в.д. (рисунок 8).

Пятая станция – станция, которая находится за плотиной (с. Бетьки) Контрольный створ примерно в 7 км от плотины. Также, недалеко находится источник сброса очищенных сточных вод ООО «ЧЕЛНЫВОДОКАНАЛ». В состав Бетькинского сельского поселения входит 4 населенных пункта: посёлок Кама, деревня Круглое поле, село Бетьки, Посёлок Нефтебаза. Численность населения около 4500 человек. На территории с. Бетьки протекает р. Бетьки, вода которой характеризуется как жёсткая (9-12 мг-экв/л), а общая минерализация весной составляет 300-400 мг/л, зимой и летом доходит до 1000 мг/л. Координаты места: 55°40'2" с.ш. 52°08'5" в.д. (рисунок 9).



Рисунок 5 – Первая станция – правый берег р. Кама



Рисунок 6 – Вторая станция – начало города



Рисунок 7 – Третья станция – место сброса ливневых сточных вод



Рисунок 8 – Четвёртая станция – городской пляж



Рисунок 9 – Пятая станция – место за плотинной (с. Бетьки)

В период с 15 по 24 июля с каждой станции исследования р. Кама были отобраны донные осадки и моллюски для последующего лабораторного анализа. Отбор проводился с помощью пластикового ковша с глубины 0-3 см с поверхностного слоя. Далее пробы были помещены в герметично закрывающиеся сосуды. Размерные характеристики двустворчатых моллюсков из р. Кама, представлены в табл. 2. Также производилась подготовка образцом тканей для анализа концентрации тяжёлых металлов в мягких тканях моллюсков. Вскрытие и препарирование тканей проводили сразу после доставки в лабораторию. Образцы хранились в холодильнике при - 20°C. Пробы были отправлены в ООО «Лаборатория» на определение следующих показателей: цинк, свинец, медь, марганец, кадмий, олово, железо.

3.4 Индекс состояния (Condition Index)

Перед отправкой в лабораторию у моллюсков были измерены: длина, высота, ширина, вес моллюска, вес раковины и вес мягких тканей. Такие параметры нужны для расчёта индекса состояния CI (Condition Index). Данные измерений и расчётов представлены в таблице 2. CI показывает процентное содержание мягких тканей в раковине моллюска. Согласно Prgić (2019) CI отражает физиологические и биоэнергетические изменения в организме. Также, Gosling (1992) считал, что доступность пищи и изменения в фазах размножения являются наиболее важными факторы, влияющими на CI двустворчатых моллюсков. Для двустворчатых моллюсков существуют различные методы расчета CI, основанные на влажном и сухом весе. Согласно Davenport и Chen (1987), можно применять формулу для нахождения CI, где используется отношение влажного веса к массе раковины (1). По данным Almeida и др. (1999), CI можно рассчитывать, как отношение влажного веса мягких тканей моллюска к общему весу (2).

$$CI = \frac{\text{Влажный вес}}{\text{Масса раковины}} \times 100 \quad (1)$$

$$CI = \frac{\text{Влажный вес}}{\text{Общий вес}} \times 100 \quad (2)$$

Таблица 2 – Размеры для трёх моллюсков, отобранных на разных станциях

| № станции | № мол | Длина, мм | Высота, мм | Ширина, мм | Вес общий, г | Вес раковины, г | Вес мягких тканей, г |
|-----------|-------|-----------|------------|------------|--------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 1 | 78 | 33 | 23 | 28 | 16 | 11,8 |
| | 2 | 81 | 40,5 | 25 | 35,5 | 24,1 | 10,5 |
| | 3 | 79 | 34,5 | 25 | 33 | 17,6 | 12,7 |
| Среднее | | 79,3±1,53 | 36±3,97 | 24,3±1,15 | 32,2±3,82 | 19,2±4,29 | 11,7±1,11 |
| 2 | 1 | 62 | 32 | 23 | 20,8 | 14,6 | 5,6 |
| | 2 | 62 | 29 | 21 | 19,3 | 13,3 | 5,1 |
| | 3 | 63 | 33 | 22 | 24,1 | 14,2 | 8,1 |
| Среднее | | 62,3±0,58 | 31,3±2,08 | 22±1,00 | 21,4±2,46 | 14±0,67 | 6,3±1,61 |
| 3 | 1 | 52 | 24 | 15 | 11,2 | 7,4 | 3,3 |
| | 2 | 54 | 25 | 20 | 14,4 | 10,1 | 4,2 |
| | 3 | 51 | 27 | 18 | 11,3 | 3,8 | 7,3 |
| Среднее | | 52,3±1,53 | 25,3±1,53 | 17,7±2,52 | 12,3±1,82 | 7,1±3,16 | 4,9±2,10 |
| 4 | 1 | 66 | 33,5 | 24 | 29,7 | 18,4 | 7,6 |
| | 2 | 67,5 | 34 | 22 | 25,3 | 16,7 | 8,2 |
| | 3 | 66 | 32 | 22 | 22,2 | 15,1 | 6,4 |
| Среднее | | 66,5±0,87 | 33,2±1,04 | 22,7±1,15 | 25,7±3,77 | 16,7±1,65 | 7,4±0,92 |
| 5 | 1 | 66 | 33 | 22 | 26,3 | 17,2 | 7,8 |
| | 2 | 62 | 30 | 21 | 17,4 | 12 | 5,2 |
| | 3 | 67 | 32 | 25 | 19,4 | 14,2 | 5,6 |
| Среднее | | 65±2,65 | 31,7±1,53 | 22,7±2,08 | 21±4,67 | 14,5±2,61 | 6,2±1,40 |

Таблица 3 – Посчитанные индексы CI_1 и CI_2 для моллюсков, отобранных на разных станциях

| Номер станции | CI_1 | CI_2 | CI_1/CI_2 |
|---------------|--------|--------|-------------|
| 1 | 60,9 | 36,3 | 1,7 |
| 2 | 45,0 | 29,6 | 1,5 |
| 3 | 69,0 | 39,8 | 1,7 |
| 4 | 44,3 | 28,8 | 1,5 |
| 5 | 42,8 | 29,5 | 1,5 |

Анализируя данные из таблицы 3 можно заметить, что наибольшие величины по CI были на 3 станции – 69,0 и 39,8 (место сброса ЛВ), а наименьшие были на 5 станции (район за плотиной (с. Бетьки)) – 42,8 и 29,5. Такие различия могут являться следствием влияния различных факторов таких, как температура, солёность, концентрация кислорода, доступность пищи и изменение репродуктивного цикла. Поэтому данный показатель может варьироваться из года в год. Высокие значения индекса возникают, когда особи

находятся во взрослом состоянии, а снижение СІ проявляется в период после нереста и когда животное находится в состоянии покоя.

3.5 Результаты лабораторного исследования

На каждой станции были отобраны донные осадки, моллюски и был проведён лабораторный анализ по следующим показателям: цинк, свинец, медь, марганец, кадмий, олово, железо. Анализ выполнен сотрудниками ООО «Лаборатория»: определение массовой доли тяжёлых металлов в мягких тканях проводилось масс-спектрометром Agilent 7500a (квадрупольный ICP MS), анализ седиментов проводился атомно-эмиссионным спектрометром с индуктивно-связанной плазмой марки IСАР 6300.

По полученным результатам можно сделать вывод, что наибольшая массовая доля железа, марганца, свинца в мягких тканях была обнаружена у моллюсков, отобранных на третьей станции (место сброса ЛВ). На пятой станции наибольшая концентрация кадмия, меди и цинка (таблица 4). В то же время олово в мягких тканях было обнаружено в точках 1, 2, 4, что можно объяснить тем, что р. Кама является судоходной рекой. Например, в точке под названием «начало города» содержание олова достигает $0,35\pm 0,14$ мг/кг. Следует отметить, что рядом с ней неподалеку расположен причал, где довольно часто пришвартовываются транспортные суда.

Таблица 4 – Результаты лабораторного анализа содержания тяжёлых металлов в мягких тканях моллюсков

| ТМ, мг/кг | Мягкие ткани | | | | |
|-----------|-----------------------|-------------------|---------------------|--------------------|----------------------------|
| | Правый берег Камы (1) | Начало города (2) | Место сброса ЛВ (3) | Городской пляж (4) | За плотиной (с.Бетьки) (5) |
| Fe | 1700±500 | 1900±500 | 3000±800 | 1600±500 | 2800±800 |
| Cd | 0,58±0,29 | 0,9±0,4 | 1,4±0,7 | 0,55±0,28 | 1,6±0,8 |
| Mn | 2000±600 | 7400±2200 | 8800±2600 | 3600±1100 | 6600±2000 |
| Cu | 7,1±1,4 | 7,9±1,6 | 9,2±1,8 | 8,5±1,7 | 10,4±2,1 |
| Sn | 0,2±0,08 | 0,35±0,14 | <0,1* | 0,32±0,13 | <0,1* |
| Pb | 0,55±0,14 | 0,92±0,23 | 1,6±0,4 | 0,78±0,19 | 1,3±0,3 |
| Zn | 126±25 | 180±40 | 170±30 | 150±30 | 190±40 |

*0,1 мг/кг – порог чувствительности измерений. При расчёте BCF для этого случая использовались значения 0,1 мг/кг.

Сравнительный анализ концентраций тканей моллюсков со станций 1-5 показал наибольшие концентрации для марганца и железа. С точки зрения влияния на функциональное состояние моллюсков в различных точках акватории важно именно содержание различных тяжелых металлов в тканях моллюсков. Наиболее значимые по превышению концентрации металлы (марганец, свинец и железо: в наиболее загрязненной

точке №3 (8800 мг/кг, 1,6 мг/кг и 3000 мг/кг, соответственно). Для сравнения: в условно чистом природном водоеме (Польша) (Rzymiski и др., 2013) для содержания в тканях того же вида моллюсков (19 мг/кг, 0,21 мг/кг и 67 мг/кг, соответственно), что меньше, чем для исследованных нами моллюсков в 460, в 7,6 и в 45 раз, соответственно. Для таких металлов, как медь и цинк содержание в тканях для точки №3 (9,2 мг/кг и 170 мг/кг) превышает содержание в тканях для условно чистого водоема (4,6 и 51 мг/кг) только в 2 и 3,3 раза, соответственно.

Результаты лабораторного анализа содержания тяжёлых металлов в донных осадках представлены в таблице 5. Наибольшие концентрации таких тяжёлых металлов, как железо, кадмий, марганец, медь, свинец и цинк были обнаружены на 3 станции (место сброса ЛВ). А олово, в свою очередь, на этой станции напротив, находится вне зоны чувствительности эмиссионного спектрометра, то есть его концентрация составляет менее 0,1 мг/кг. Согласно литературным данным, донные отложения акваторий р. Кама представлены песчаными и глинистыми илами (точки: 1,2,3,5). Городской пляж представлен сугубо песчаным дном.

Таблица 5 – Результаты лабораторного анализа содержания тяжёлых металлов в донных осадках

| ТМ, мг/кг | Донные осадки | | | | | | |
|--------------|-----------------------|-------------------|---------------------|--------------------|----------------------------|--|--|
| | Правый берег Камы (1) | Начало города (2) | Место сброса ЛВ (3) | Городской пляж (4) | За плотиной (с.Бетьки) (5) | Содержание частиц <0,01 мм менее 30%** | Содержание частиц <0,01 мм более 30%** |
| Fe | 5200±1500 | 7600±2100 | 15000±4000 | 4000±1100 | 9200±2600 | - | - |
| Cd | <0,05* | 0,21±0,11 | 0,56±0,28 | 0,05±0,025 | 0,11±0,06 | 0,48 | 0,92 |
| Mn | 260±80 | 520±160 | 1100±300 | 170±50 | 780±230 | 453,8 | 925,0 |
| Cu | 3,2±0,6 | 15±3 | 19±4 | 3±0,6 | 8,1±1,6 | 17,0 | 31,1 |
| Sn | <0,1* | <0,1* | <0,1* | <0,1* | <0,1* | - | - |
| Pb | 1,7±0,4 | 4,5±1,1 | 23±6 | 3,1±0,8 | 3,4±0,9 | 10,4 | 18,8 |
| Zn | 10,7±2,1 | 14,7±2,9 | 40±8 | 11,8±2,4 | 23±5 | 42,5 | 74,9 |

*0,1 мг/кг и 0,05 мг/кг – порог чувствительности измерений для Sn и Cd. При расчёте BCF для этого случая использовались значения 0,1 мг/кг для олова и 0,05 мг/кг для кадмия.

** Региональные нормативы фонового содержания тяжелых металлов (ТМ) в донных отложениях поверхностных водных объектов Республики Татарстан, мг/кг (Приказ Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан от 27 марта 2019 г. № 316-п "Об утверждении региональных нормативов "Фоновое содержание тяжелых металлов в донных отложениях поверхностных водных объектов Республики Татарстан". URL: http://pravo.tatarstan.ru/rus/oiv/min/eco/?npa_id=352971).

Перечень определяемых показателей был выбран исходя из методического указания по осуществлению государственного мониторинга водных объектов в части организации и проведения наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов (Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 24 февраля 2014 г. № 112 «Об утверждении Методических указаний по осуществлению государственного мониторинга водных объектов в части организации и проведения наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов»). URL: <https://docs.cntd.ru/document/499081160>). Выше по течению находится Пермский край, который богат различными предприятиями. Так, бассейн р. Кама используется для нужд теплоэнергетики, химической и лесной промышленности. Также, в данном регионе расположен Кизелёвский угольный бассейн, благодаря которому в точке 2 (начало города) можно было ожидать повышенного содержания металлов в донных осадках таких металлов, как Fe, Cd, Pb, Zn, Cu, Mn. Повлиять может Пермский целлюлозно-бумажный комбинат, который может свой вклад в загрязнение седиментов такими металлами, как Mn, Fe, Cu. Что касается Sn, то его поступление в воду р. Кама может быть связано с использованием органометаллической краски на основе олова для предотвращения обрастания дна судов. Также, Пермь является региональным центром машиностроения, что может являться источником загрязнения тяжёлыми металлами. Более того, близлежащие населенные пункты, например, Чусовой, Лысьва, Краснокамск могут быть источником загрязнения р. Кама. В этих городах находятся такие предприятия, как Чусовской металлургический завод, Лысьвенский завод нефтяного машиностроения "Лысьванефтемаш", Лысьвенский металлургический завод, Краснокамский ремонтно-механический завод (КРМЗ), Целлюлозно-бумажный комбинат "Кама" (ЦБК "Кама").

Если говорить о ГЭС, которая располагается в конце города Набережные Челны, то вполне вероятно, что она может внести свой вклад в виде Cu. Поэтому вполне вероятно обнаружить повышенные концентрации меди в точке 5, которая, в свою очередь, находится за ГЭС.

Анализируя таблицу 5, можно заметить, что в точке 3 (место сброса ЛВ) были обнаружены повышенные значения по ряду металлов. Так, массовая доля железа составляет 15000 мг/кг, что на 97% выше, чем в точке 2 (начало города) и на 275% выше, чем в точке 4 (городской пляж). Массовая доля кадмия – 0,56 мг/кг и это выше на 167%, чем в точке 2 и на 1020 % выше, чем в точке 4. Массовая доля марганца составляет 1010 мг/кг, что выше на 111%, чем в точке 2 и выше на 547%, чем в точке 4. Массовая доля меди равна 19 мг/кг – это выше на 27%, чем в точке 2 и на 533%, чем в точке 4. Олово не

находится в зоне чувствительности на всех точках исследования. Массовая доля свинца составляет 23 мг/кг – выше на 411%, чем в точке 2 и выше на 642%, чем в точке 4. Массовая доля цинка равна 40 мг/кг – это выше на 172%, чем в точке 2 и на 239%, чем в точке 4.

Можно проследить, что вода, поступившая в город, имела повышенные значения по ряду металлов, но в то же время, в точке 3 (место сброса ЛВ) происходит дополнительное загрязнение тяжёлыми металлами. В точке 4 концентрация исследуемых поллютантов значительно меньше, что говорит о способности к самоочищению реки. После плотины, в районе с. Бетьки, можно заметить, что концентрация тяжелых металлов выросла.

Таким образом, вода, которая поступает в город может иметь повышенные значения по ряду металлов в связи с производственной деятельностью в Пермском крае. Согласно лабораторным исследованиям, концентрация тяжёлых металлов в р. Кама в районе г. Набережные Челны увеличивается в точке 3 (место сброса ЛВ). В этой точке организован сброс ливневых вод в состав которых входят: атмосферные осадки, загрязняющие вещества, которые привносятся благодаря ветру, вещества от деятельности автотранспорта и местного производства. В точке 4 (городской пляж) наблюдается уменьшение массовой доли исследуемых тяжёлых металлов, но в точке 5 (за плотиной (с.Бетьки)) можно заметить резкое увеличение концентрации тяжёлых металлов в связи со сбросом сточных вод организацией ООО «ЧЕЛНЫВОДОКАНАЛ». Главным клиентом водоканала является Камский автозавод. В состав ОАО «КАМАЗ» входят следующие предприятия: Metallургический комплекс (литейный и кузнечный заводы), Завод двигателей. Прессово-рамный завод, Автомобильный завод, Ремонтно-инструментальный завод, Индустриальный парк "Мастер" и "Ремдизель". Поэтому в точке 5 можно наблюдать повышенные значения по ряду металлов в сравнении с точкой 2, а именно Fe, Mn и Zn. Так массовая доля железа больше на 21%, марганца на 50%, а цинка на 56%.

3.6 Индексы MPI и VCF

Индекс загрязнения металлами (MPI) представляет собой расчетную величину, позволяющую сравнивать моллюсков различных акваторий по общему содержанию тяжелых металлов в их мягких тканях. MPI рассчитывается для того, чтобы можно было представить все результаты измерения концентраций металлов в тканях в виде одного значения.

Известно, что тяжёлые металлы могут накапливаться в различных организмах, повреждать их ткани и подавлять рост и, в конечном счете, воздействовать на людей,

питающихся этими организмами. Серьезная проблема загрязнения тяжелыми металлами весьма актуальна в связи с их токсичностью и способностью накапливаться в биоте.

Для сравнения общего содержания металлов в моллюсках разных станций отбора проб использовали МРІ. МРІ был получен с помощью формулы:

$$MPI = (C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n)^{1/n} \quad (3)$$

Где C_1 , C_2 и C_n (мг/кг) - средние концентрация тяжёлых металлов в каждом пресноводном моллюске (там, где средняя концентрация тяжёлых металлов в мягких тканях была меньше предела обнаружения метода исследования, были использованы значения предела обнаружения).

Таблица 6 – Результаты расчёта МРІ

| Название точки | Значение МРІ |
|----------------------------|--------------|
| Правый берег Камы (1) | 19,223 |
| Начало города (2) | 24,815 |
| Место сброса ЛВ (3) | 26,529 |
| Городской пляж (4) | 19,329 |
| За плотиной (с.Бетьки) (5) | 26,570 |

Наибольшие значения индекса наблюдается на двух акваториях – место сброса ЛВ (26,529) и за плотиной (с. Бетьки) (26,570). Наименьшее значение индекса в точке, которая находится на правом берегу Камы – 19,223

Коэффициент биоконцентрации (BCF) использовался для оценки взаимосвязи тяжелых металлов в пресноводных моллюсках и связанных с ними отложениях, который можно рассчитать, как:

$$BCF = \frac{C_{mollusc}}{C_{sediment}} \quad (4)$$

где $C_{mollusc}$ и $C_{sediment}$ (мг/кг) означают средние концентрации тяжёлых в моллюсках и в донных осадках, соответственно.

Таблица 7 – Результаты расчёта BCF

| Название точки / Значение BCF | Fe | Cd | Mn | Cu | Sn | Pb | Zn |
|----------------------------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| Правый берег Камы (1) | 0,327 | 11,600 | 7,692 | 2,219 | 2,000 | 0,324 | 11,776 |
| Начало города (2) | 0,250 | 4,286 | 14,231 | 0,527 | 3,500 | 0,204 | 12,245 |
| Место сброса ЛВ (3) | 0,200 | 2,500 | 8,000 | 0,484 | 1,000 | 0,070 | 4,250 |
| Городской пляж (4) | 0,400 | 11,000 | 21,176 | 2,833 | 3,200 | 0,252 | 12,712 |
| За плотиной (с.Бетьки) (5) | 0,304 | 14,545 | 8,462 | 1,284 | 1,000 | 0,382 | 8,261 |

Наибольшее значение индекса по Fe, Mn, Cu, Zn получено в точке 4 (городской пляж), что предположительно связано с составом донных осадков. Городской пляж представлен песчаным дном, которое не аккумулирует загрязняющие вещества, поэтому средняя концентрация тяжёлых металлов в седиментах оказалась мала. Но накопление металла в тканях моллюсков возможно также и при его поступлении при фильтрации взвешенных частиц, загрязненных тяжелыми металлами. Наименьшее значение индекса было в точке 3 (место сброса ЛВ). Там средняя концентрация Fe, Cd, Cu, Sn, Pb, Zn в мягких тканях моллюсков значительно меньше, чем в донных отложениях. Наибольшие значения индекса по олову получены в точке 2 (начало города), так как в этом месте находится причал. Таким образом, повышенные значения индекса BCF можно объяснить фильтрационной особенностью моллюсков, которые аккумулируют в себе тяжёлые металлы.

3.7 Результаты тестирования адаптивной способности моллюсков

В течение 1,5 ч после отлова, моллюски доставлялись в лабораторию, где проводилось их стресс-тестирование путем соленостной функциональной нагрузки. На створках моллюсков в области сердца приклеивали сёдла, которые предназначены для прикрепления миниатюрных волоконно-оптических зондов. Данные датчики ведут постоянную регистрацию ЧСС. После прикрепления датчиков моллюсков оставляли на 2 часа для того, чтобы животное пришло в состояние покоя. По прошествии времени тест

объекты перемещали на 1 час в другой аквариум, где предварительно был добавлен NaCl для достижения концентрации солёности 6 г/л. Далее моллюсков возвращали на 2 часа в первый аквариум с нормальной солёностью для того, чтобы в дальнейшем определить время восстановления ($T_{\text{восст}}$) ЧСС. Таким образом, суммарная продолжительность одного эксперимента составляла 5 часов.

Состояние моллюсков оценивали, анализируя их реакцию на кратковременное воздействие, а именно изменение солёности воды на 6 г/л NaCl (эффект осмотической нагрузки). При изменении солёности моллюски демонстрируют защитно-оборонительную реакцию - закрывают створки, что приводит к прекращению фильтрационной активности, а также к снижению ЧСС. Полученное время восстановления ($T_{\text{восст}}$) ЧСС двустворчатых моллюсков после стресс-тестирования путем солёностной функциональной нагрузки может быть использовано для оценки физиологического состояния обитателей. Считается, что измерение и анализ трендов ЧСС двустворчатых моллюсков является полезным инструментом для оценки состояния экосистемы и может быть в дальнейшем использовано при оценке хронических воздействий водной среды. В тесте изменения солёности можно рассчитать время восстановления ЧСС у пресноводных моллюсков, чтобы оценить физиологическое состояние (здоровье) моллюсков. Пример динамики средней ЧСС до солёностной нагрузки и во время изменения солёности воды показан на рисунках 10-19. $T_{\text{восст}}$ — время, необходимое для восстановления частоты сердечных сокращений до прежнего состояния после изменения исходной солёности окружающей среды. Считается, что время восстановления достигается, когда ЧСС не отличается от фоновых значение и не изменяется в течение 30 минут.

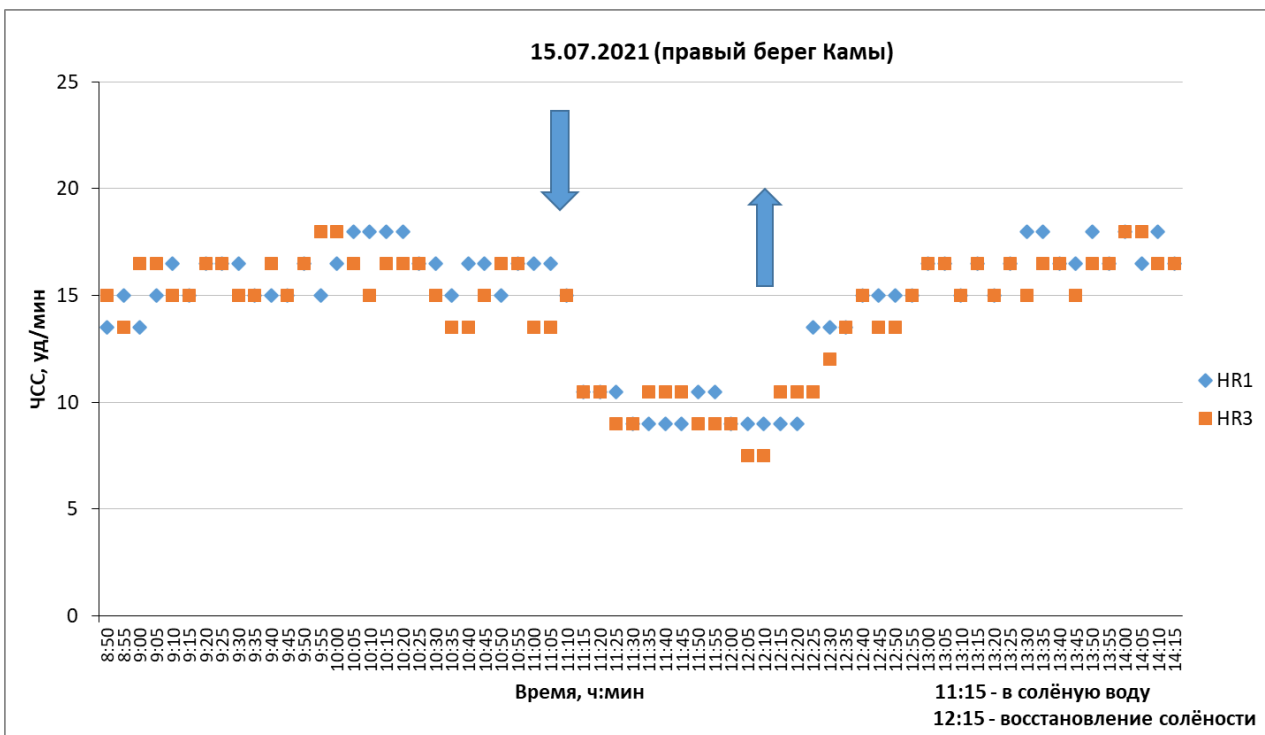


Рисунок 10 – Пример графика восстановления ЧСС моллюска на станции 1 (правый берег Камы)

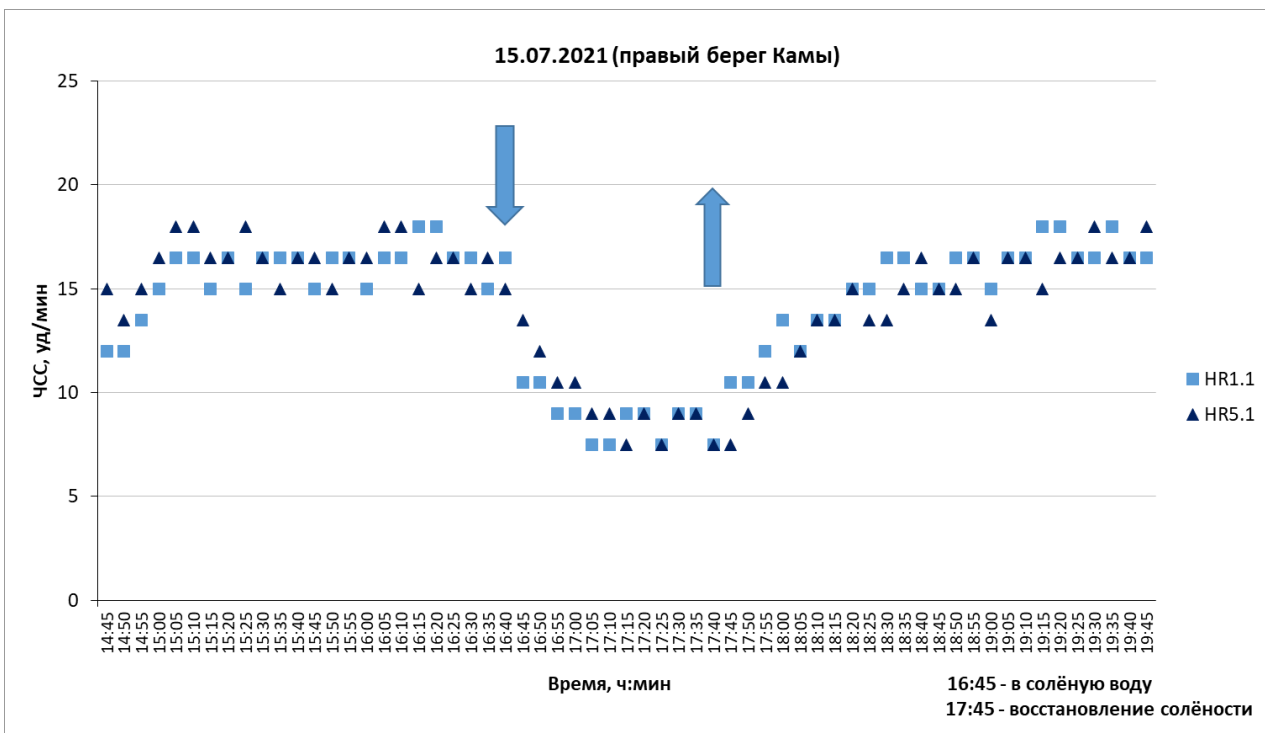


Рисунок 11 – Пример графика восстановления ЧСС моллюска на станции 1 (правый берег Камы)

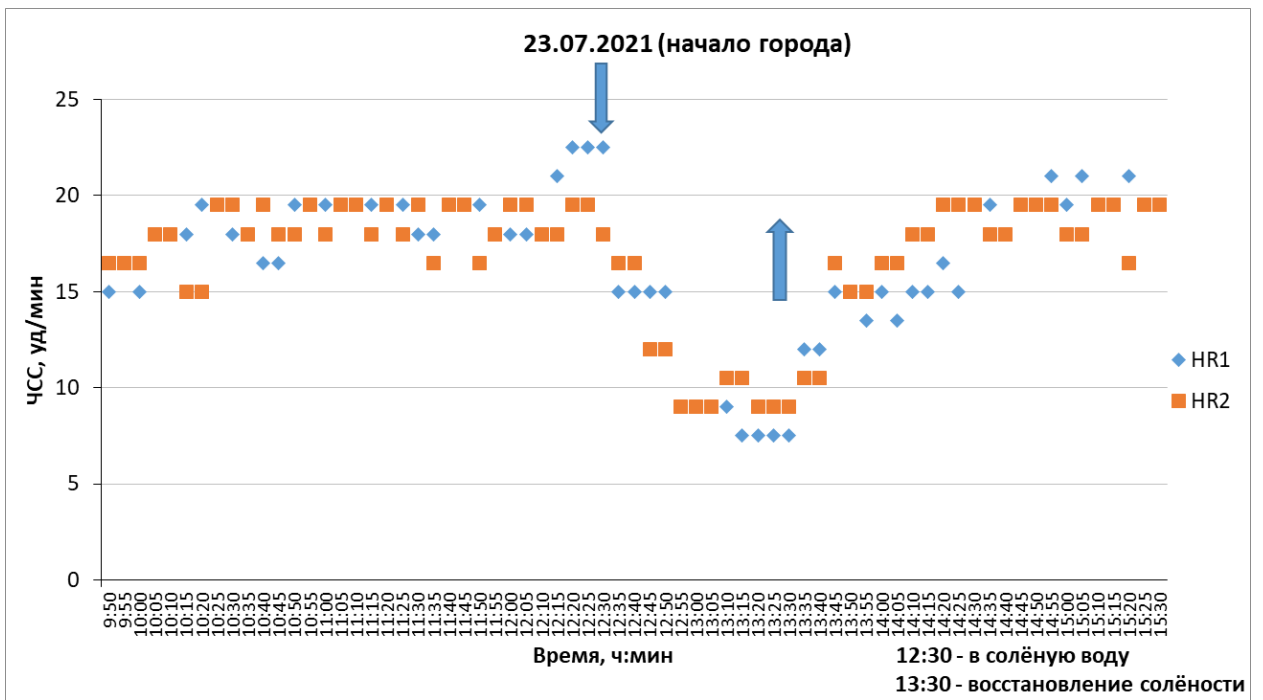


Рисунок 12 – Пример графика восстановления ЧСС моллюска на станции 2 (начало города)

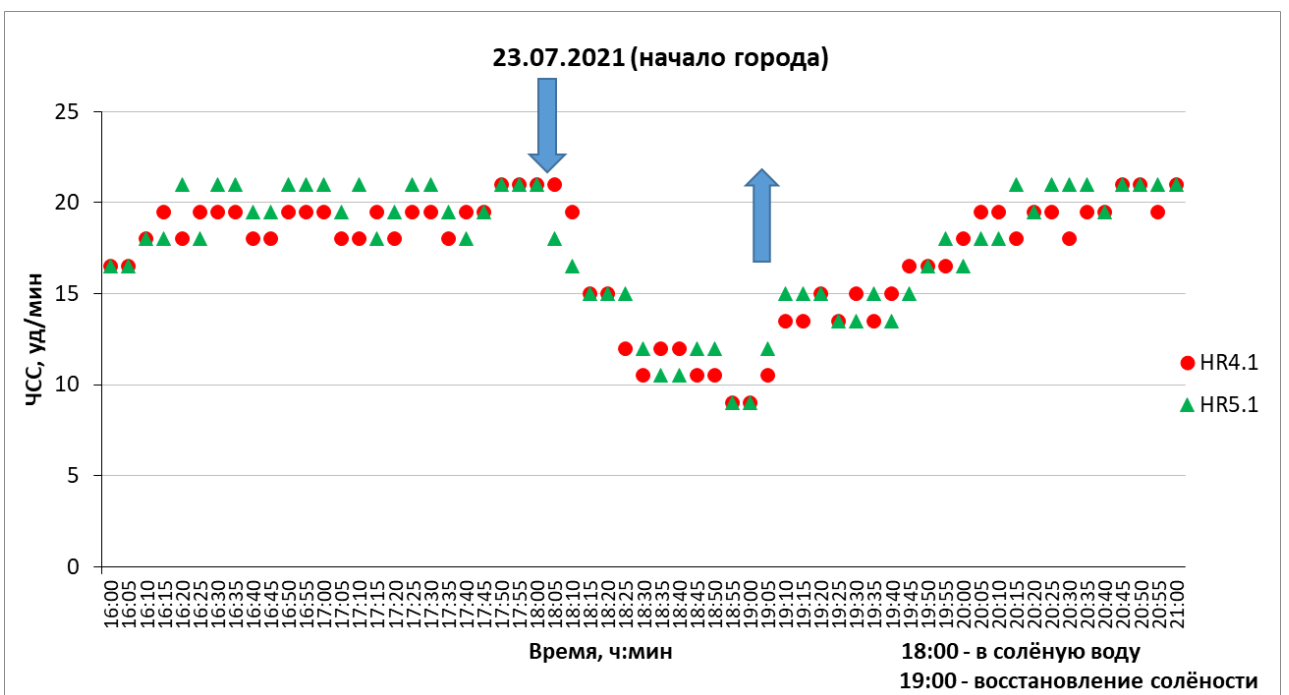


Рисунок 13 – Пример графика восстановления ЧСС моллюска на станции 2 (начало города)

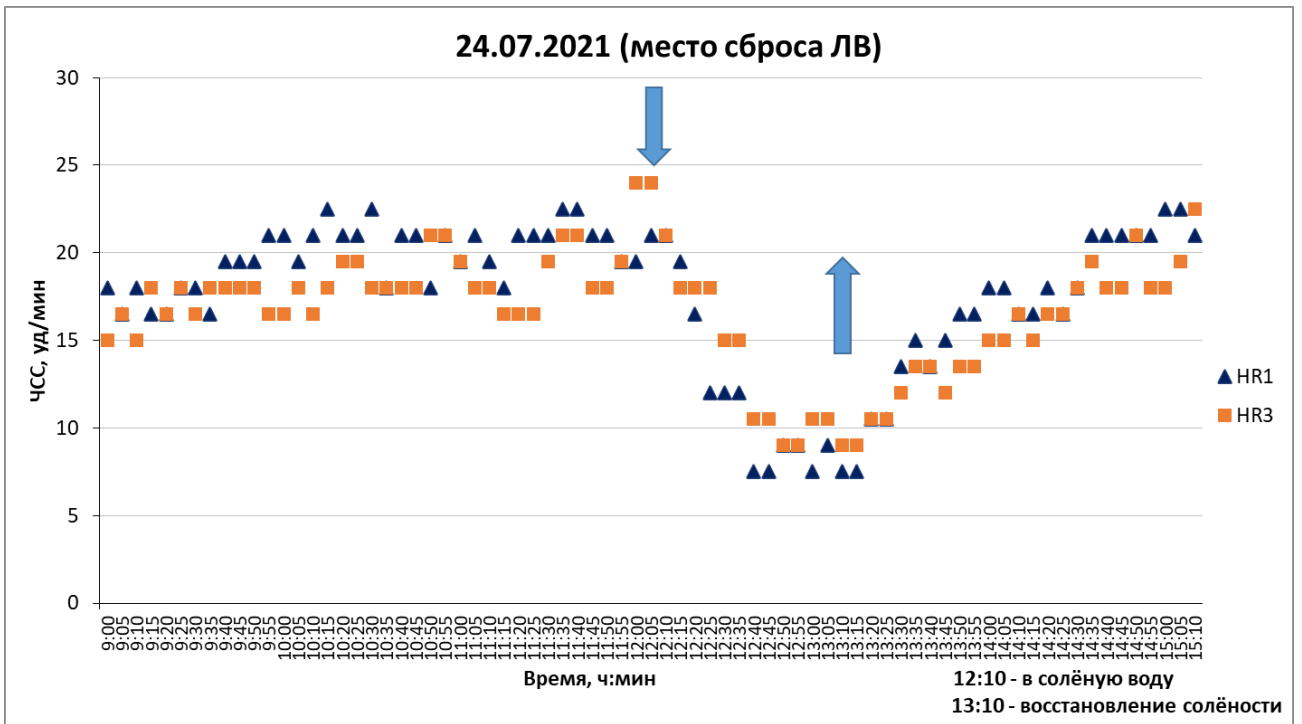


Рисунок 14 – Пример графика восстановления ЧСС моллюска на станции 3 (место сброса ЛВ)

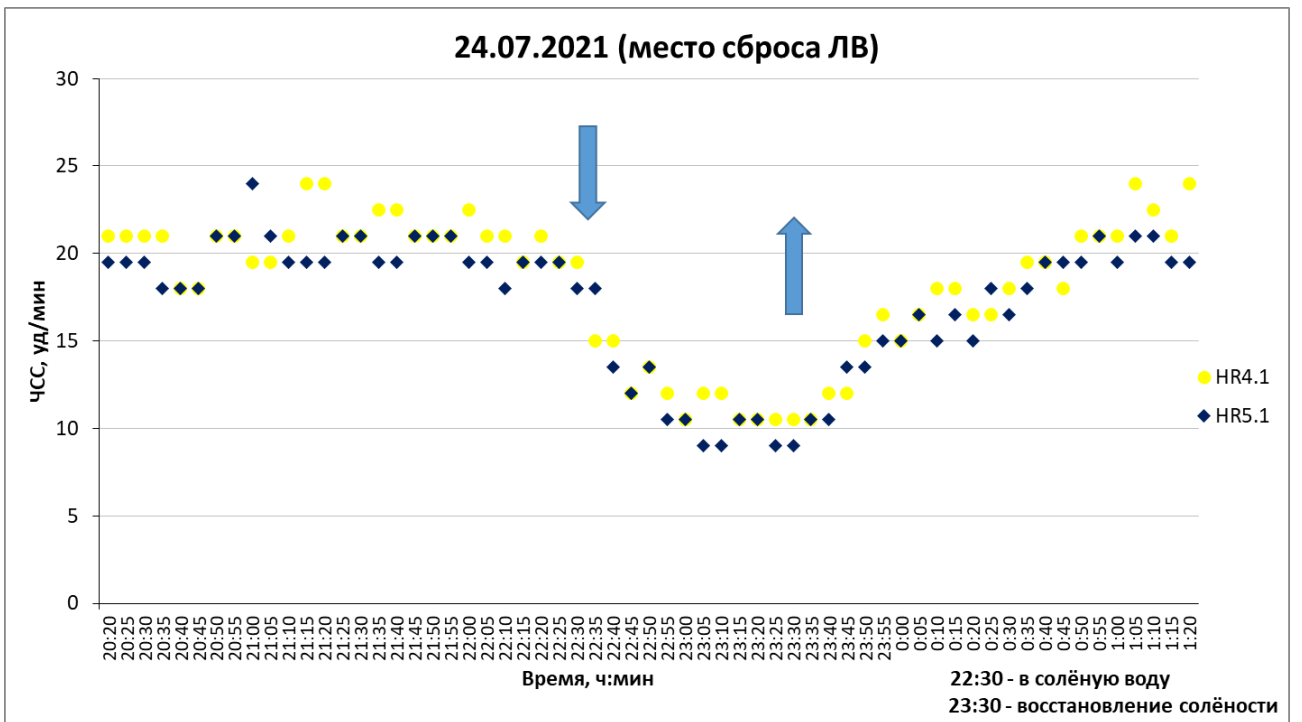


Рисунок 15 – Пример графика восстановления ЧСС моллюска на станции 3 (место сброса ЛВ)

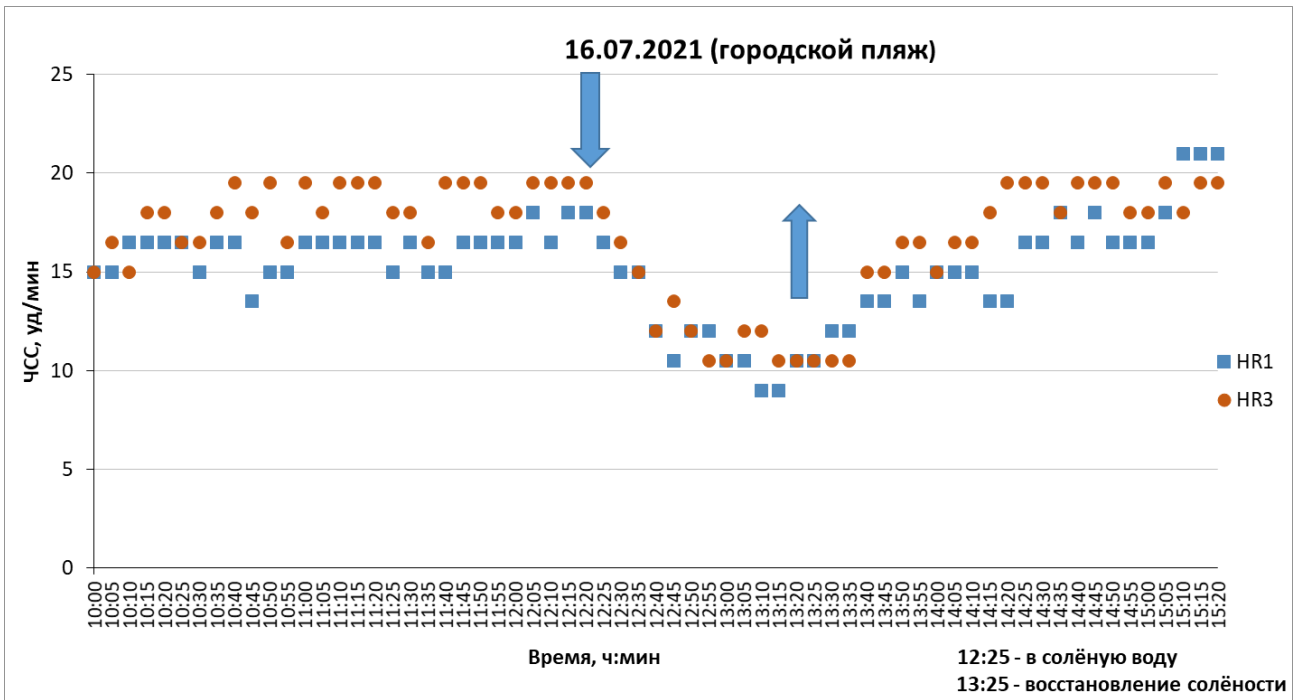


Рисунок 16 – Пример графика восстановления ЧСС моллюска на станции 4 (городской пляж)

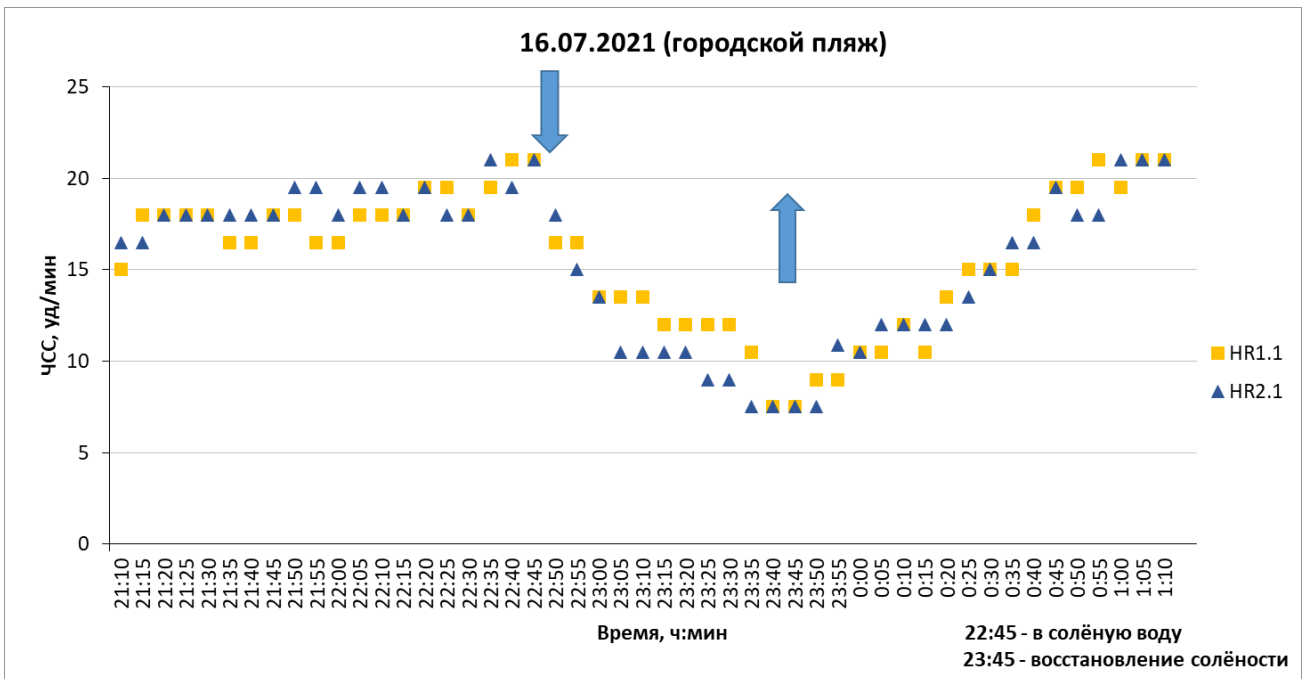


Рисунок 17 – Пример графика восстановления ЧСС моллюска на станции 4 (городской пляж)

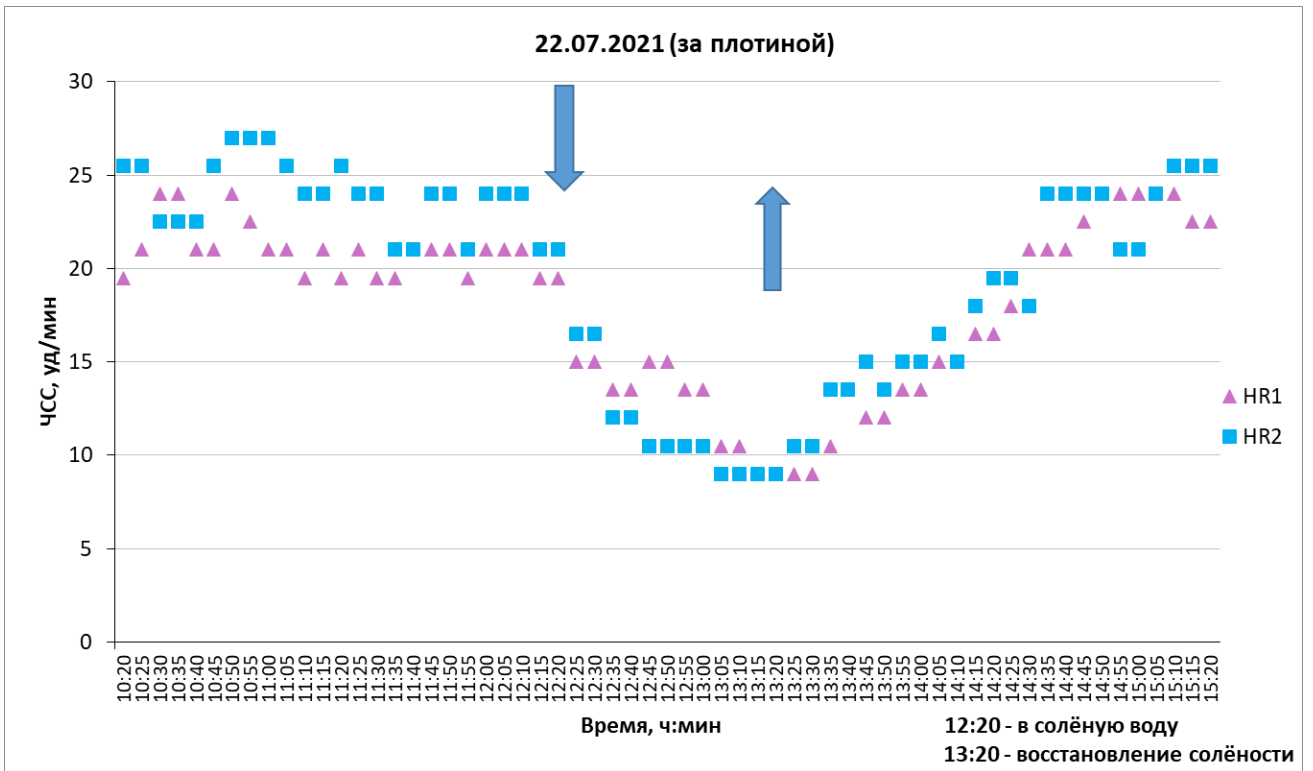


Рисунок 18 – Пример графика восстановления ЧСС моллюска на станции 5 (за плотинной)

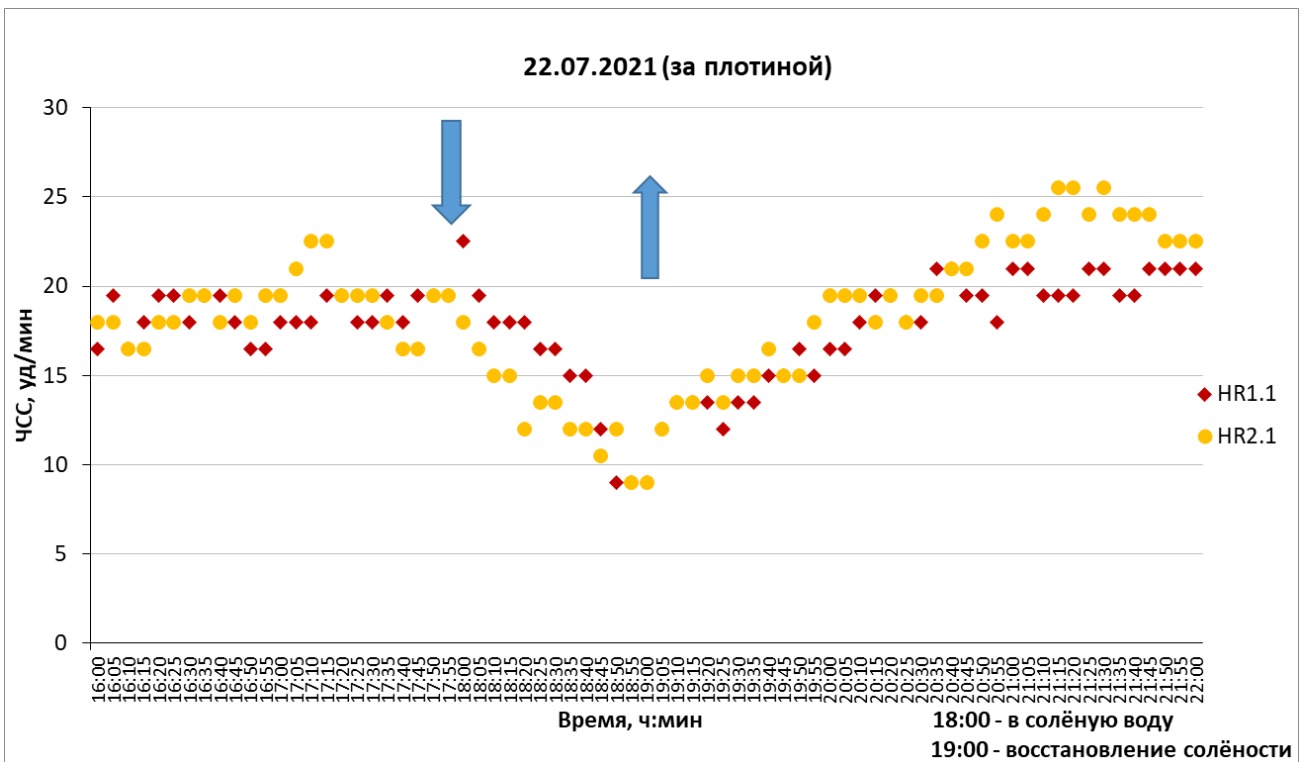


Рисунок 19 – Пример графика восстановления ЧСС моллюска на станции 5 (за плотинной)

После проведения стресс-тестирования время восстановления ЧСС моллюсков принимало следующие значения:

Таблица 8 – Значения среднего времени восстановления ЧСС моллюсков

| Название точки | Значение $T_{\text{восст,МИНУТ}}$ |
|----------------------------|--------------------------------------|
| Правый берег Камы (1) | $49,4 \pm 4,2$ |
| Начало города (2) | $64,4 \pm 7,3$ |
| Место сброса ЛВ (3) | $76,9 \pm 5,3$ |
| Городской пляж (4) | $50,0 \pm 8,5$ |
| За плотиной (с.Бетьки) (5) | $73,1 \pm 9,2$ |

Анализируя данные таблицы 8, можно заметить, что самое большое значение $T_{\text{восст}}$ достигается в точке 3 – $76,9 \pm 5,3$, где располагается место сброса ливневых вод. Приблизительно такое же время восстановления имеет точка 5, которая находится около с. Бетьки. Такие результаты можно объяснить тем, что в данных точках были найдены высокие концентрации тяжёлых металлов в донных осадках. Также, индекс загрязнения металлами (МПИ) в этих точках имеет наибольшие значения. Можно сказать, что высокие концентрации тяжёлых металлов оказывают негативное влияние на здоровье моллюсков. Самые маленькие значения времени восстановления были в точке 1 (правый берег Камы) – $49,4 \pm 4,2$ и в точке 4 (городской пляж) – $50,0 \pm 8,5$. Индекс загрязнения тяжёлыми металлами в этих точках был наименьшим в то время, как коэффициент биоконцентрации посчитанный для станции 4 был наибольшим. Можно сделать вывод, что моллюски в этих точках здоровее, чем в остальных. В точке 2 (начало города) среднее время восстановления ЧСС составляет $64,4 \pm 7,3$. Данный результат можно объяснить тем, что станция располагается в начале города, где были замечены повышенные значения в донных осадках по ряду тяжелых металлов в сравнении с точками 1 и 4. Для всех точек, где проводилось стресс-тестирование была построена диаграмма размаха в программе Statistitca для визуализации полученных данных (рисунок 20).

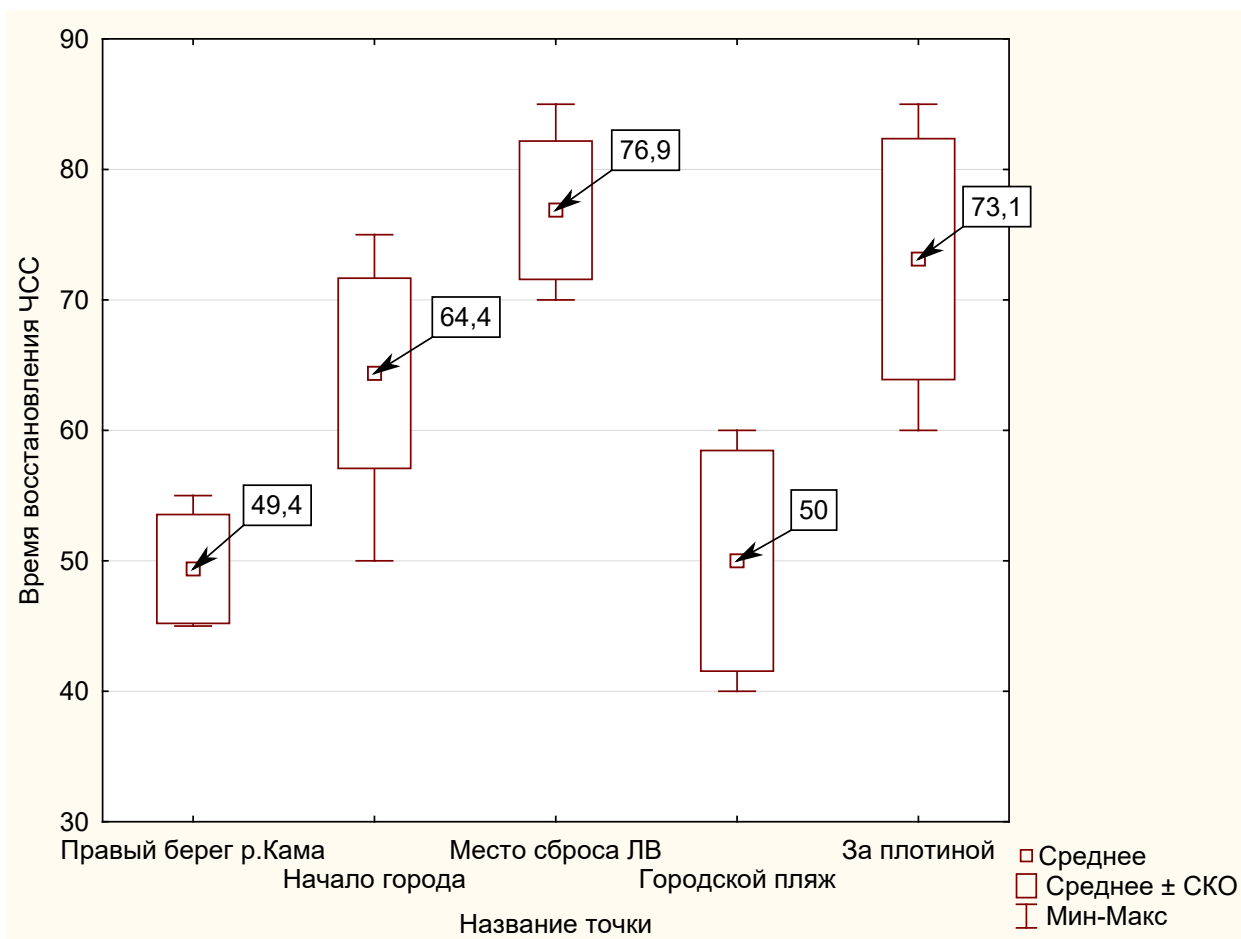


Рисунок 20 – Средние значения $T_{восст}$ ЧСС для каждой станции

Предварительно перед статистическим анализом была проведена проверка на нормальность по критерию Шапиро-Уилка (приложение 1). Данный критерий используется тогда, когда выборка удовлетворяет следующему условию – $8 \leq n \leq 50$. В нашем случае условие выполняется, поэтому допустимо использовать проверку на нормальность по критерию Шапиро-Уилка (ГОСТ Р ИСО 5479-2002). Проверка полученных данных, по данному критерию, показала нормальное распределение. В связи с этим были использованы параметрические методы статистики для дальнейшего анализа.

По каждой станции, где проводилось стресс-тестирование, для полученных значений среднего времени восстановления ЧСС определили среднее, медиану, стандартное отклонение, минимум, максимум. Полученные в ходе статистической обработки данные представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Описательная статистика для времени восстановления ЧСС по каждой станции

| Название точки | N | Среднее | Медиана | Минимум | Максимум | СКО |
|-------------------------|---|---------|---------|---------|----------|------|
| Правый берег р. Кама | 8 | 49,38 | 50,00 | 45,00 | 55,00 | 4,17 |
| Начало города | 8 | 64,38 | 65,00 | 50,00 | 75,00 | 7,29 |
| Место сброса ЛВ | 8 | 76,88 | 77,50 | 70,00 | 85,00 | 5,30 |
| Городской пляж | 8 | 50,00 | 50,00 | 40,00 | 60,00 | 8,45 |
| За плотиной (с. Бетьки) | 8 | 73,13 | 75,00 | 60,00 | 85,00 | 9,23 |

После проверки на нормальность был выполнен тест Левена на равенство дисперсий, где уровень значимости (p) был $> 0,05$ следовательно дисперсии однородны. Далее провели дисперсионный анализ ANOVA для поиска зависимости полученных данных, а именно влияние фактора на отклик. В нашем случае фактором является станция, для которой проводилось стресс-тестирование, а отклик – полученные результаты в виде среднего времени восстановления ЧСС. После проведения анализа ANOVA уровень значимости (p) был $< 0,05$ – фактор влияет на отклик. Нужно выяснить в каких парах различия существенные, а в каких нет. Для этого использовался тест Тьюки результаты которого представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты теста Тьюки для определение значимых различий в парах

| | Правый берег Камы | Начало города | Место сброса ЛВ | Городской пляж | За плотиной |
|-------------------|-------------------|---------------|-----------------|----------------|-------------|
| Правый берег Камы | | 0,0017* | 0,0001* | 0,9998 | 0,0001* |
| Начало города | 0,0017* | | 0,0108* | 0,0026* | 0,1264 |
| Место сброса ЛВ | 0,0001* | 0,0108* | | 0,0001* | 0,8306 |
| Городской пляж | 0,9998 | 0,0026* | 0,0001* | | 0,0001* |
| За плотиной | 0,0001* | 0,1264 | 0,8306 | 0,0001* | |

*Значимые различия

Таким образом, если уровень значимости (p) $> 0,05$, то значимых статистических различий в парах нет. Нет различий между следующими точкам: правый берег р. Кама и городской пляж, начало города и за плотиной, место сброса ЛВ и за плотиной.

Для оценки состояния экосистем акваторий использовали рекомендованный Европейской Водной Рамочной Директивой (ЕВРД) подход к оценке экологического состояния всех водных объектов, который измеряется при помощи коэффициента экологического качества EQR (Ecological Quality Ratio) (Directive 2000/60/EC. URL: http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/info/intro_en.htm). Основной целью применения данного коэффициента является классификация экологического статуса акваторий. Значения EQR, которые близкие к единице, можно расценивать как хорошее

экологическое состояния акватории, а близкие к 0 – плохое. Весь диапазон экологического состояния водного объекта, определенным образом зависящий от учета характера взаимосвязи между нагрузкой и воздействием на биоту, рекомендуется разделять на пять категорий качества: высокий, хороший, посредственный, плохой и очень плохой. После проведенных исследований было предложено выделить 5 пять классов диапазона $T_{\text{восст}}$, которые могут соответствовать высокому, хорошему, среднему, плохому и очень плохому экологическому состоянию водных объектов (Холодkevич и др., 2019).

Таблица 11 – Ранжирование экологического статуса водоёмов по $T_{\text{восст}}$ (Холодkevич и др., 2019).

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

Согласно данным таблицы можно сделать вывод об экологическом статусе выбранных акваторий. Правый берег Камы имеет среднее значения $T_{\text{восст}}$ $49,4 \pm 4,2$, что соответствует высокому экологическому статусу. Станция, которая находится на городском пляже имеет пограничное значение – $50,0 \pm 8,5$, следовательно экологическое состояние можно идентифицировать как хорошее. Точка, располагающаяся в начале города, имеет значение $64,4 \pm 7,3$, что относится к рангу «хороший». Такие места, как место сброса ЛВ и за плотиной (с. Бетьки), имеют значения попадающий в диапазон, экологический статус которого посредственный (таблица 12).

Таблица 12 – Экологический статус акваторий, где проводилось стресс-тестирование

| Название точки | Значение $T_{\text{восст}}$, минут | Экологический статус |
|------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Правый берег Камы | $49,4 \pm 4,2$ | Высокий |
| Начало города | $64,4 \pm 7,3$ | Хороший |
| Место сброса ЛВ | $76,9 \pm 5,3$ | Посредственный |
| Городской пляж | $50,0 \pm 8,5$ | Хороший |
| За плотиной (с.Бетьки) | $73,1 \pm 9,2$ | Посредственный |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По измеренным величинам биомаркеров $T_{\text{восст}}$ моллюсков была проведена оценка экологического статуса акваторий. Наиболее высокий статус оказался у станции 1 (правый берег Камы), хороший – станции 2 (начало города) и 4 (городской пляж), посредственный – станции 3 (место сброса ливневых вод) и 5 (за плотиной (с. Бетьки)).

2. Акватории, которые были выбраны для исследования, имели различную антропогенную нагрузку. Результаты данного исследования дали возможность оценить, как изменения этой нагрузки влияют на функциональное состояние двустворчатых моллюсков-фильтраторов *Unio pictorum* p. Кама.

3. На основе сравнительного анализа концентраций тяжелых металлов (Fe, Cd, Mn, Cu, Sn, Pb, Zn) в мягких тканях моллюсков и в донных осадках, отобранных в этих акваториях было установлено значительное превышение концентрации марганца, свинца и железа именно в тех рекреационных акваториях г. Набережные Челны, в которых наблюдался самый низкий экологический статус, оцененный по биомаркеру $T_{\text{восст}}$ моллюсков. Это, по-видимому, позволяет предположить, что наиболее вероятной причиной их «посредственного» экологического статуса, с точки зрения «здоровья» моллюсков, является загрязнение этих акваторий и мягких тканей моллюсков именно данными металлами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Almeida, M. J. Growth and bio-chemical composition of *Crassostrea gigas* (Thunberg) and *Ostrea edulis* (Linne) in two estuaries from the North of Portugal. / M. J. Almeida, J. Machado, J. Coimbra // *J. Shellfish Res.* – 1999. – Vol. 18. – P.139–146.
2. Angermeier, P. L. Ecological Health Indicators/ P. L. Angermeier, J. S. Karr // *Encyclopedia of Ecology*, 2nd edition – 2019. – Vol. 1 – P.391-401.
3. Arora, H.C. Rotifer as indicators of trophic nature of environments / H. C. Arora // *J. Hydrobiologia* – 1966. – Vol. 27(1–2). – P. 146–159.
4. Azizi, G. The use of *Mytilus* spp. mussels as bioindicators of heavy metal pollution in the coastal environment. / G. Azizi, M. Akodad, M. Baghour, M. Layachi, A. Moumen // *J. Mater. Environ. Sci.* – 2018. – Vol. 9(4). – P. 1170-1181.
5. Burkhard, B. Ecosystem Health Indicators/ B. Burkhard, F. Müller, A. Lill // *Encyclopedia of Ecology* – 2008. – P. 1132-1138.
6. Davenport, J. A comparison of methods for the assessment of condition in the mussel (*Mytilus galloprovincialis*)/J Davenport, X. Chen // *J. Moll. Stud.* – 1987. – Vol. 53. – P. 293–297.
7. Directive 2000/60/EC [Электронный ресурс]. http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/info/intro_en.htm (дата обращения 11.04.2022)
8. Eds. K. Rivers of Europe / K. Eds, U. Tockner, Ch. Uehlinger, T. Robinson // Amsterdam: Elsevier. – 2009. – 700 pp.
9. Gosling, E. M. Systematics and geographic distribution of *Mytilus*. In: Gosling, E. M. (Ed.): *The mussel Mytilus: Ecology, physiology, genetics and culture.* // Elsevier, Amsterdam. – 1992. – P. 1–20.
10. Hosmani, S.P. Freshwater algae as indicators of water quality. / S. P. Hosmani // *Univers. J. Environ. Res. Technol.* – 2013. – Vol. 3(4). – P. 473–482.
11. Humboldt, A. Recherches sur la respiration des poissons / A. Humboldt, J-M. Provençal // *Mém Phys Chim Soc d'Arcueil.* – 1809. – Vol. 2. – P. 559.
12. Józwiak, M. A. Bioindication as challenge in modern environmental protection. / M. A. Józwiak, M. Józwiak // *Ecol Chem Eng S.* – 2014. – Vol. 21(4). – P.577-591.
13. Khatri, N. Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas. / N. Khatri, S. Tyagi // *Front Life Sci.* – 2015. – Vol. 8(1). – P. 23–39.

14. Luna-Acosta, A. Detection of early effects of a single herbicide (diuron) and a mix of herbicides and pharmaceuticals (diuron, isoproturon, iburpofen) on immunological parameters of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) spat. / A. Luna-Acosta, T. Renault, H. Thomas-Guyon, N. Faury, D. Saulnier, H. Budzinski, K. Le Menach, P. Pardon, I. Fruitier-Arnaudin, P. Bustamante // *Chemosphere* – 2012. – Vol. 87. – P. 1335–1340.
15. Manickavasagam, S. Bioindicators in aquatic environment and their significance / S. Manickavasagam, C. Sudhan, S. Aanand Bharathi // *J. Aqua Trop* – 2019. – Vol. 34. – P. 73-79.
16. Osborn, W.S. Variation in clones of *Penstemon* growing in natural areas of differing radioactivity. / W. S. Osborn // *Science* – 1961. – Vol. 134. – P. 342-343.
17. Pattanayak, S. Bioindicator Emerged as a Potential Environmental Marker. / S. Pattanayak, S. Das, K. Navyasri // *IJAEB* – 2020. – Vol.13(3). –P. 339-344.
18. Prgić, A. (2019): Usporedba morfometrijskih odnosa i indeksa kondicije dagnje *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 s područja Rovinja u sjevernom Jadranu. Završni rad. Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Sveučilišni preddiplomski studij Znanost o moru, Pula, 34 pp.
19. Regnault, V. Recherches chimiques sur la respiration des animaux des diverses classes / V. Regnault, J. Reiset // *Ann Chim Phys Ser 3.* – 1849. – Vol. 26. – P. 299–519.
20. Rzymiski, P. Bioaccumulation of selected metals in bivalves (*Unionidae*) and *Phragmites australis* inhabiting a municipal water reservoir/ P. Niedzielski, P. Klimaszyk, B. Poniedziałek // *Environ Monit Assess.* – 2014. – № 186. – P. 3199–3212.
21. Walsh, G.E. Toxic effects of pollutants on plankton. / G. E. Walsh // *Principles of ecotoxicology.* New York (NY): Wiley. – 1978. Vol. 12. – P. 257-274.
22. Беляева П.Г. О.С. Содержание растительных пигментов в воде и донных отложениях водохранилищ Р. Камы/ Беляева П. Г, Минеева Н.М., Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А., Макарова // *Труды ИБВВ РАН.* – 2018. – №81. – 84 с.
23. Все реки. Информационный сайт о реках России [Электронный ресурс]. URL:<http://vsereki.ru/reki-vnutrennego-stoka/bassejn-kaspijskogo-morya/volga/kama> (дата обращения 06.12.2021).
24. ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения. – Москва: Изд-во стандартов, 2002. – 30 с.
25. Государственного доклад «О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2020 году». Казань: Минприроды Республики Татарстан, 2021, 402 с.
26. Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы. Научно-прикладной справочник. – Санкт-Петербург: изд. ГГИ, 2015. – 135 с

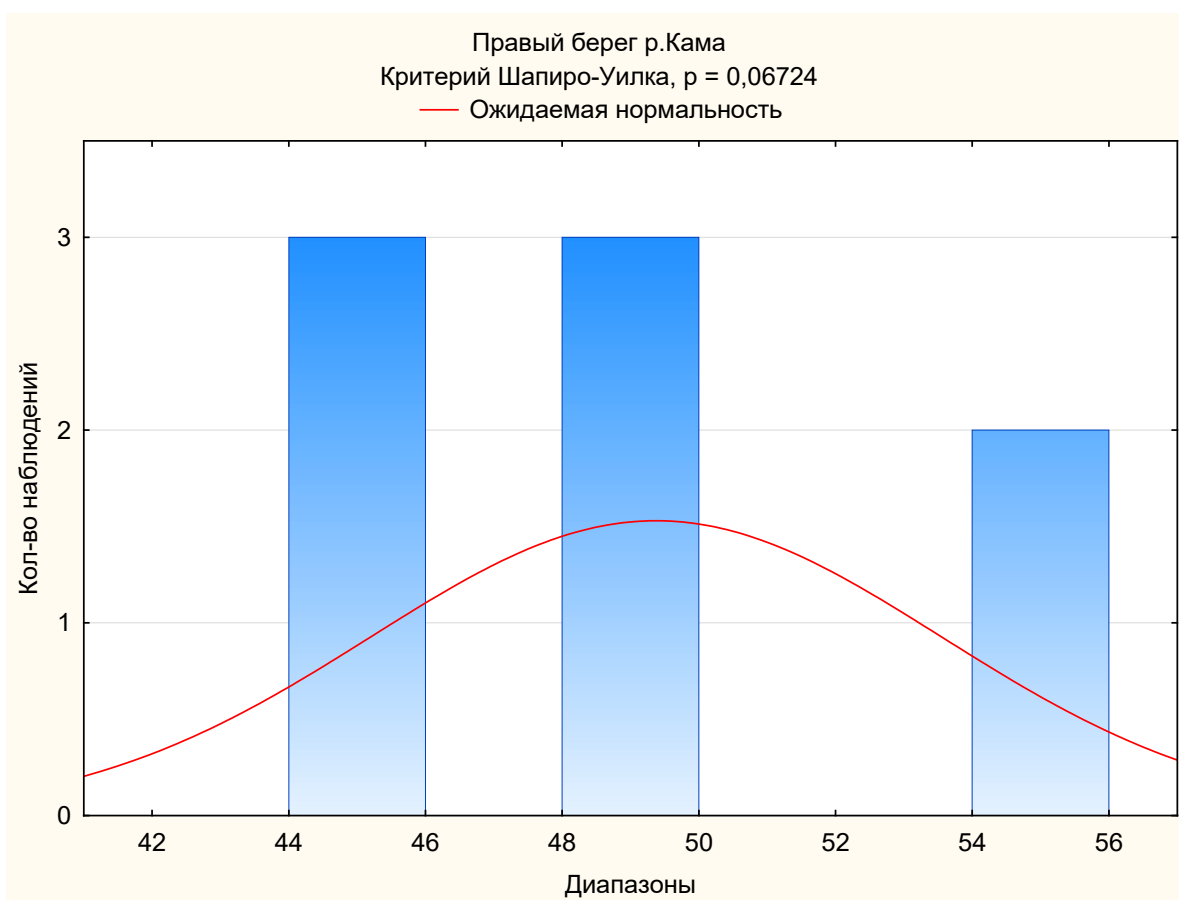
27. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 24 февраля 2014 г. № 112 «Об утверждении Методических указаний по осуществлению государственного мониторинга водных объектов в части организации и проведения наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов». Доступ из электронного фонда правовой и нормативно-технической информации «Кодекс». Источник: <https://docs.cntd.ru/document/499081160>.
28. Приказ Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан от 27 марта 2019 г. № 316-п «Об утверждении региональных нормативов "Фоновое содержание тяжелых металлов в донных отложениях поверхностных водных объектов Республики Татарстан»». Доступ из официального портала правовой информации Республики Татарстан. Источник: http://pravo.tatarstan.ru/rus/oiv/min/eco/?npa_id=352971.
29. Холодкевич, С. 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. – 2015. – № 2(37). – С. 16-26.
30. Холодкевич, С.В. Новый методологический подход к оперативной оценке экологического состояния прибрежных морских акваторий / С. В. Холодкевич, Т.В. Кузнецова, А.С. Куракин, А.А. Солдатов, О.Л. Гостюхина, И.В. Головина, Т.И. Андреевко, М.П. Киринов // Известия ТИНРО. – 2018. – т. 194.
31. Холодкевич, С.В. 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. – 2019. – Том 46, № 2. – С. 214–224.
32. Холодкевич, С.В., Биоэлектронный мониторинг поверхностных вод / С. В. Холодкевич, А. В. Иванов, Е. Л. Корниенко, А.С. Куракин, В.А. Любимцев // Мир измерений. – 2011. – № 10. – С. 6-13.

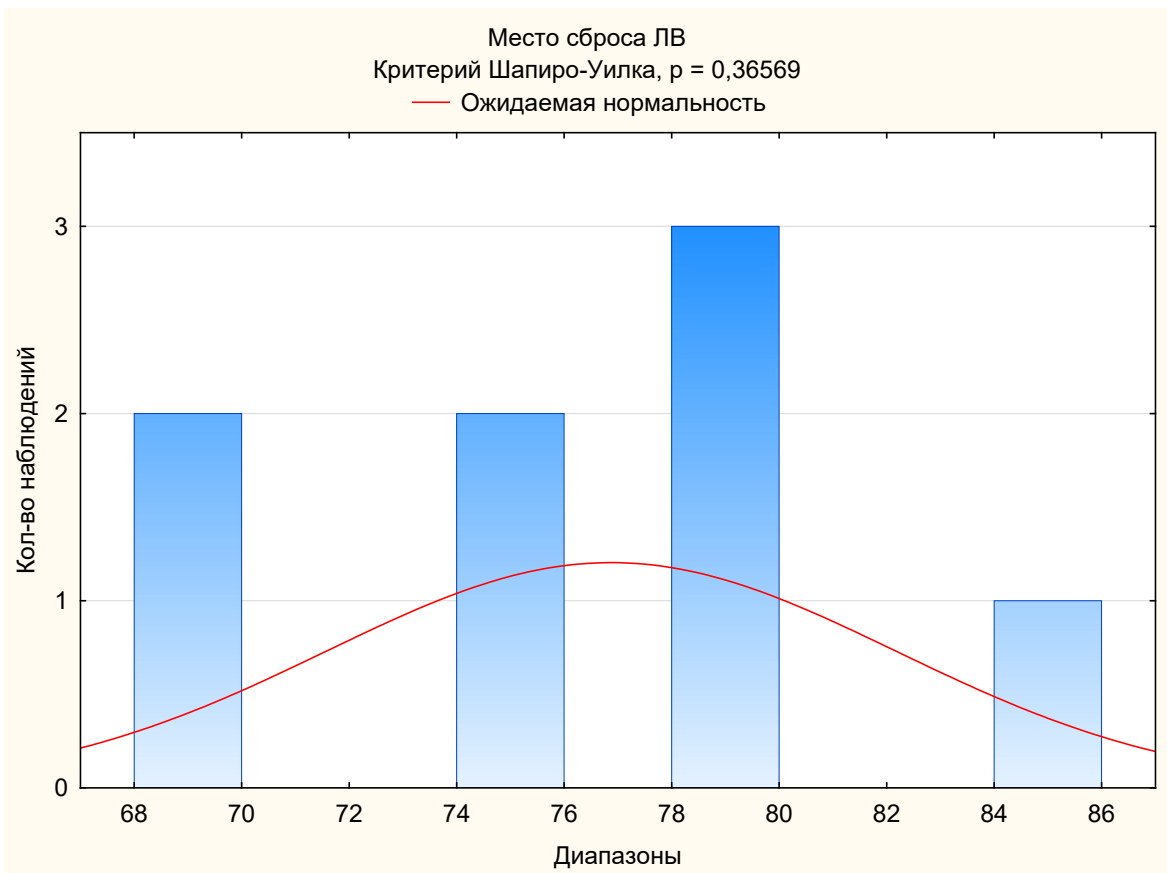
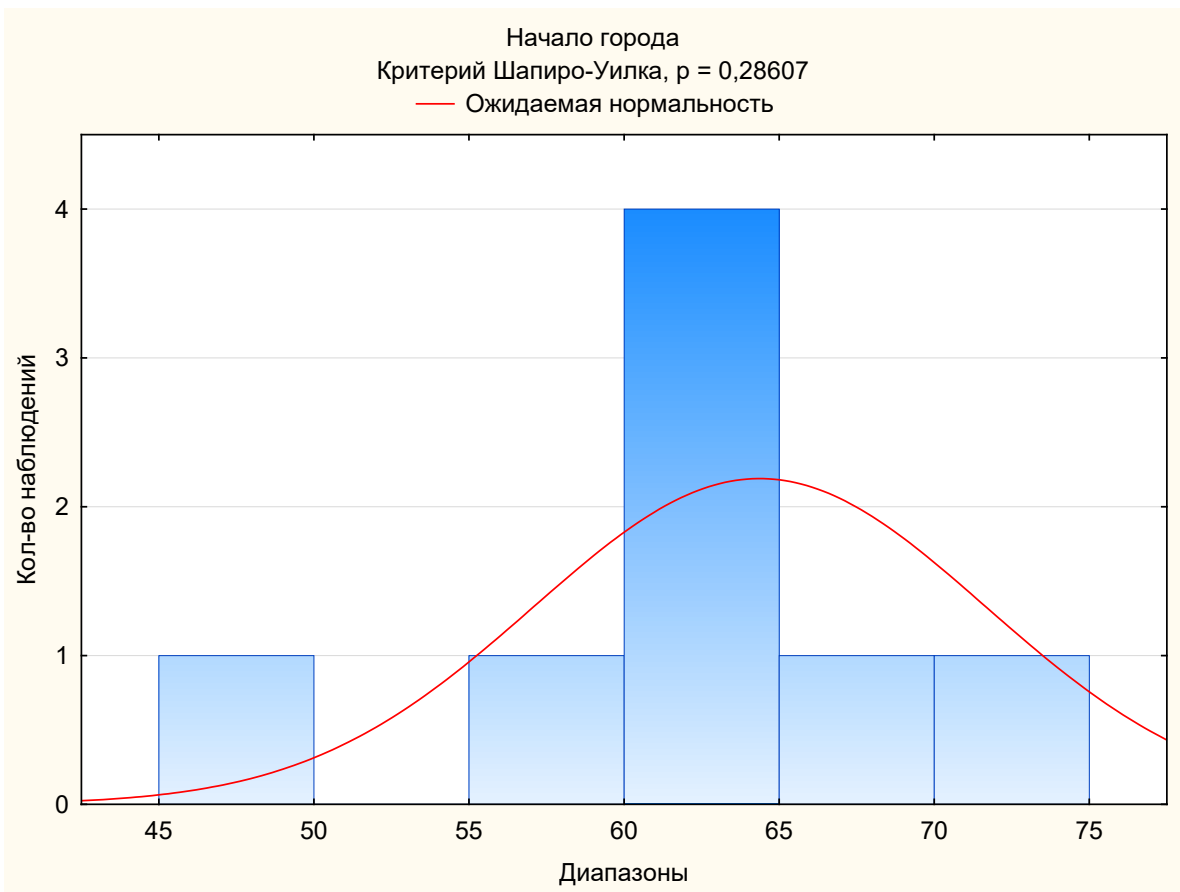
ПРИЛОЖЕНИЯ

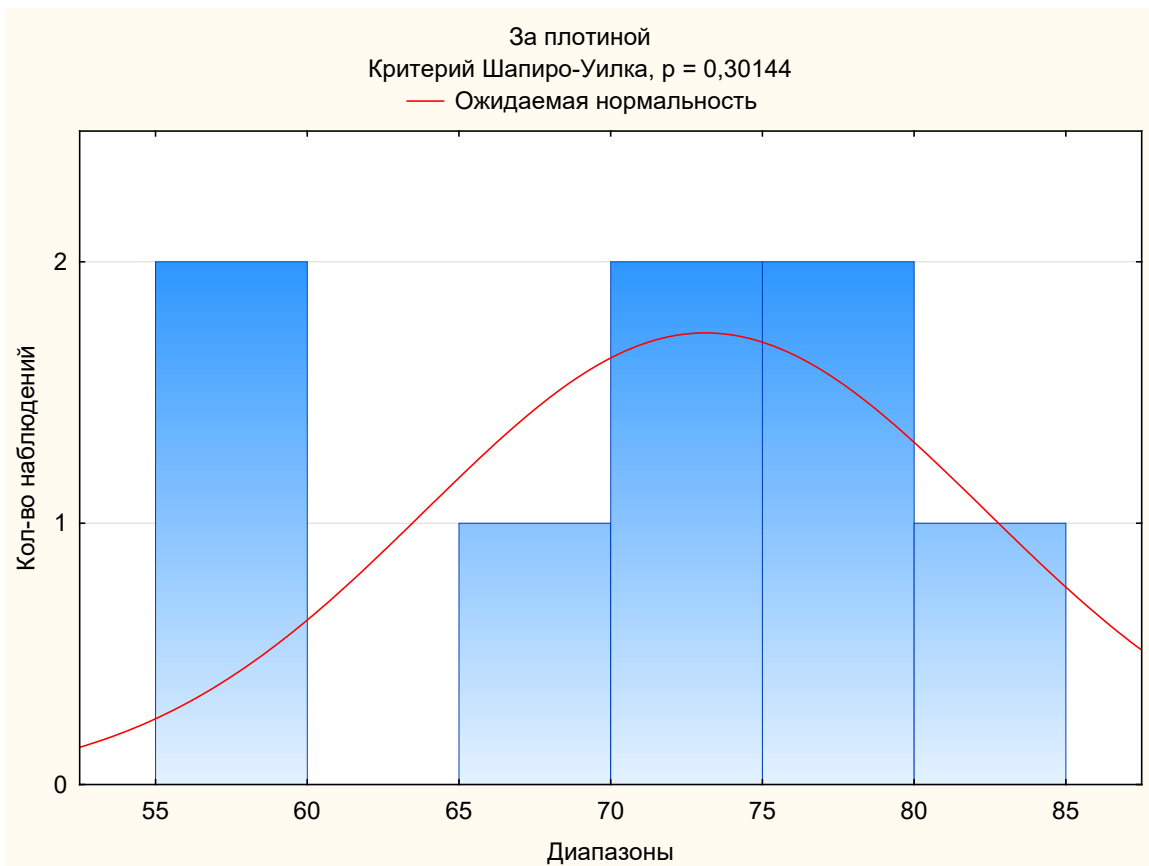
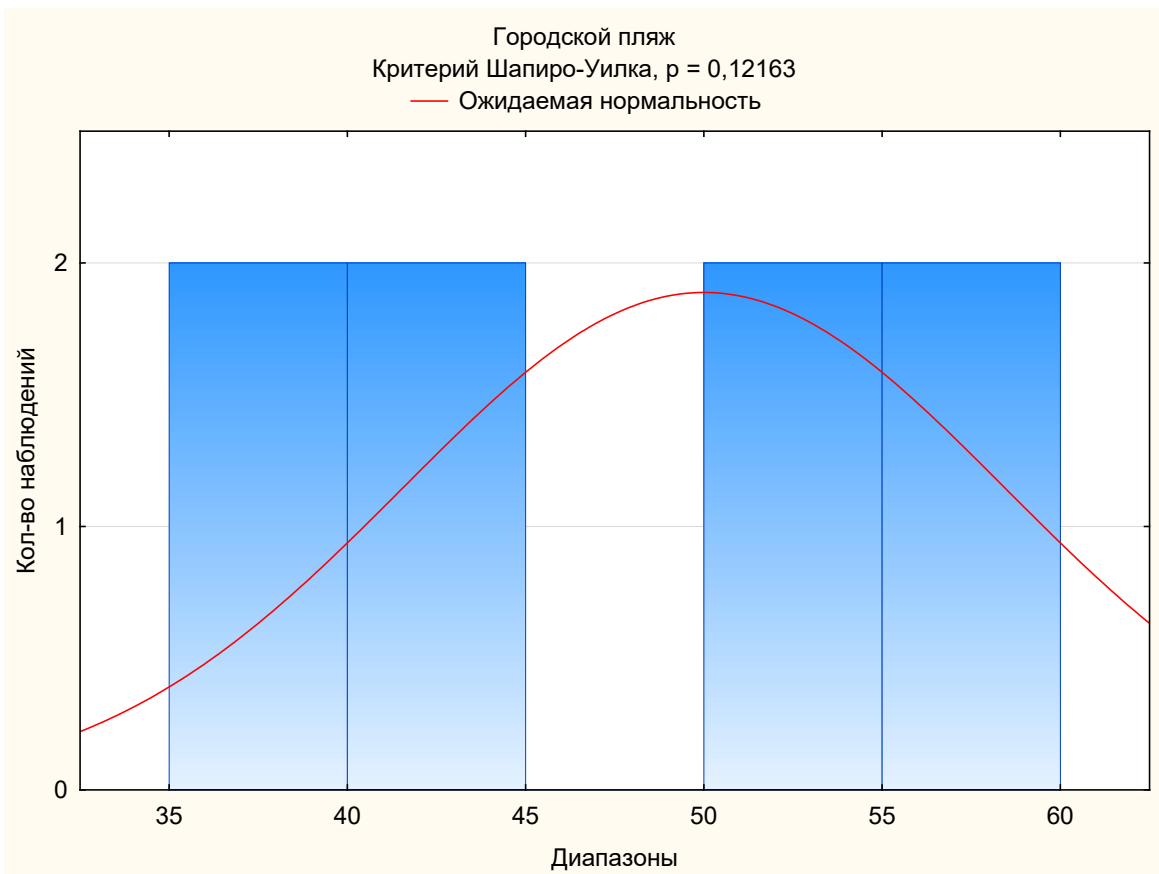
Приложение №1 статистическая обработка полученных результатов

Перед выполнением статистической обработки нужно проверить на нормальность распределения полученных данных. Это определит дальнейший метод статистики – параметрический или непараметрический. Критерий Шапиро-Уилка подходит только в том случае, когда количество данных не меньше 8, но не больше 50. В случае превышения используется критерий Колмогорова-Смирнова. В нашем случае количество данных удовлетворяют условию, который указан в ГОСТ Р ИСО 5479-2002, следовательно, для проверки на нормальность использовался критерий Шапиро-Уилка.

Проверка на нормальность по критерию Шапиро-Уилка







Проверка на нормальность показала, что данные имеют нормальное распределение, те уровень значимости (p) был $> 0,05$, поэтому использовали параметрические методы статистики. Прежде чем выполнять тест ANOVA нужно проверить однородность дисперсий и для этого использовали тест Левена.

| Переменная | Тест Левена | | | | | | |
|--------------------------|-------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-------|
| | SS Effect | df Effect | Ms Effect | SS Error | df Error | Ms Error | p |
| Время восстановления ЧСС | 113,83 | 4 | 28,46 | 491,02 | 35 | 14,03 | 0,112 |

Уровень значимости (p) по Тесту Левена составляет 0,112, что $> 0,05$ следовательно дисперсии однородны. В случае равенства дисперсий проводится тест ANOVA для выявления зависимости полученных данных. Нужно выяснить влияет станция на полученные результаты, а именно время восстановления ЧСС.

| Переменная | ANOVA | | | | | | |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-------|
| | SS Effect | df Effect | Ms Effect | SS Error | df Error | Ms Error | p |
| Время восстановления ЧСС | 5210 | 4 | 1302,5 | 1787,5 | 35 | 51,071 | 0,000 |

Согласно тесту ANOVA уровень значимости (p) $< 0,05$, что говорит о том, что фактор влияет на отклик, то есть станция влияет на полученные результаты. Для выяснения в каких конкретных парах есть статистически значимые различия использовали тест Тьюки.

| Тест Тьюки | | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------|-----------------|----------------|-------------|
| | Правый берег Камы | Начало города | Место сброса ЛВ | Городской пляж | За плотиной |
| Правый берег Камы | | 0,0017* | 0,0001* | 0,9998 | 0,0001* |
| Начало города | 0,0017* | | 0,0108* | 0,0026* | 0,1264 |
| Место сброса ЛВ | 0,0001* | 0,0108* | | 0,0001* | 0,8306 |
| Городской пляж | 0,9998 | 0,0026* | 0,0001* | | 0,0001* |
| За плотиной | 0,0001* | 0,1264 | 0,8306 | 0,0001* | |

*Значимые различия

Таким образом, если уровень значимости (p) $> 0,05$, то значимых статистических различий в парах нет. Нет различий между следующими точкам: правый берег р. Кама и городской пляж, начало города и за плотиной, место сброса ЛВ и за плотиной. В остальных случаях были обнаружены статистически значимые различия.