

Комплексная оценка экологического состояния участка трансграничной реки Нарвы

© 2024. Т. В. Кузнецова, к. б. н., с. н. с.,

А. Б. Манвелова, н. с., Ю. М. Поляк, к. т. н., с. н. с.,

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, 199178, Россия, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., д. 39, e-mail: kuznetsova_tv@bk.ru

Проведено комплексное исследование экологического состояния участка трансграничной реки Нарвы (граница Россия – Эстония) ниже по течению от г. Ивангорода Кингисеппского района Ленинградской области. Оно включало анализ данных химических показателей загрязнения природной воды реки, с акцентом на содержании некоторых тяжёлых металлов в воде, седиментах и в мягких тканях местных моллюсков-фильтраторов, которых в данном исследовании использовали в качестве биоиндикаторов загрязнения реки в данной локации. В максимальных концентрациях в донных осадках определялся Zn, затем Cu, в меньшей степени Pb, Cd и Ni. Коэффициент биоконцентрации металлов, рассчитанный в мягких тканях мидий, показал максимум для Zn и Cu, в меньшей степени для Pb, Cd и минимальный – для Ni. Выявленные концентрации не оказывают отрицательного влияния на представителей местной биоты, что было показано при физиологическом тестировании двустворчатых моллюсков с участка исследований. Оценка функционального состояния представителей местной биоты – двустворчатых моллюсков – методом неинвазивной регистрации кардиоритма и применение тестовой нагрузки позволили характеризовать функциональный статус моллюсков и их адаптивные возможности как хорошие. Определена относительная численность углеводородокисляющих бактерий в пищеварительном тракте моллюсков из р. Нарвы как показатель загрязнённости среды обитания нефтепродуктами. Отмечено, что численность углеводородокисляющих бактерий не превышает величин, характерных для референтных акваторий Финского залива Балтийского моря. По совокупности проведённых исследований сделан вывод, что воды реки в исследуемой локации можно характеризовать как умеренно загрязнённые, а экологическое состояние изучаемой локации как удовлетворительное.

Ключевые слова: комплексная оценка экологического состояния, химические показатели качества воды, тяжёлые металлы в седиментах и тканях моллюсков, углеводородокисляющие бактерии, функциональное состояние двустворчатых моллюсков.

Comprehensive assessment of the ecological state of the transboundary Narva River

© 2024. T. V. Kuznetsova ^{ORCID: 0000-0002-4848-1806}

A. B. Manvelova ^{ORCID: 0000-0003-0628-7033}, Y. M. Polyak ^{ORCID: 0000-0002-9490-2392}
St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
39, 14 line V.I., St. Petersburg, Russia, 199178,
e-mail: kuznetsova_tv@bk.ru

A comprehensive study of the ecological state on the transboundary Narva River (Russia – Estonia border) downstream of Ivangorod, Kingisepp District, Leningrad Region, was carried out. It included the determination of chemical indicators of pollution of the natural river water, with an emphasis on some heavy metals content in water, sediments and soft tissues of local filter-feeding mollusks; the latter were used as bioindicators of river pollution in this location. Zn was determined in maximum concentrations in bottom sediments, then Cu, to a lesser extent Pb, Cd and Ni. The coefficient of metal bioconcentration calculated in soft tissues of mollusks showed maximum for Zn and Cu, to a lesser extent for Pb, Cd and minimum for Ni. However, such values have no negative effect on local biota as shown by physiological testing of bivalves from study site. The functional assessment of bivalves by non-invasive cardiac rhythm recording made it possible to characterize their functional status and adaptive capabilities as good. The relative abundance of hydrocarbon-oxidizing bacteria in the digestive tract of mollusks from the Narva River has been determined as an indicator of environmental pollution by oil products. It was noted that the number of hydrocarbon-oxidizing bacteria does not exceed the values characteristic of the reference waters of the Eastern Gulf of Finland. Based on the totality of the studies, it was concluded that the river waters in the studied location can be characterized as slightly polluted and its ecological status as of a good quality.

Keywords: comprehensive assessment of the ecological status, chemical indicators of water quality, heavy metals in sediments and tissues of mollusks, hydrocarbon-oxidizing bacteria, functional status of bivalves.

Комплексная оценка природных вод в связи с вопросом о количестве воды и требованиям к её качеству – приоритетная государственная задача [1]. Особое внимание представляют трансграничные реки, например, река Нарва, что обусловлено международными требованиями. Река впадает в Балтийское море, являющееся внутренним для семи европейских государств. Мониторинг качества вод р. Нарвы в конкретных створах проводится Северо-Западным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в рамках работы Совместной Эстонско-Российской комиссии по охране и рациональному использованию трансграничных водоёмов на протяжении уже 25 лет.

С экологической точки зрения, качество окружающей среды определяется как стабильное состояние и функционирование всех составляющих экосистемы [2]. Критерием хорошего качества вод природного водоёма может служить способность биоценоза поддерживать характеристики среды обитания, быстро восстанавливать любые повреждения своей целостности, адаптироваться к внешним воздействиям.

Биологические индикаторы здоровья рек можно выбрать из ряда таксономических групп (например, рыбы, водоросли, птицы, беспозвоночные животные). Пробоотбор водных беспозвоночных может использоваться для мониторинга непрерывных или прерывистых нарушений, а также воздействия одиночных или множественных стрессоров и загрязнителей воды, которую они населяют, поскольку их реакции являются комплексной мерой воздействия на окружающую среду [3–5]. Таким образом, оценка качества природных вод, кроме традиционного физико-химического мониторинга, может быть основана на изучении функционального состояния (здоровья) основных представителей биоты изучаемой экосистемы, например, моллюсков [6, 7].

Целью работы являлось проведение комплексной оценки экологического состояния участка трансграничной реки Нарвы ниже г. Ивангорода с использованием разных методических подходов и оценочных критериев.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлась р. Нарва в районе стационарного пункта наблюдений за загрязнённостью поверхностных вод – г. Ивангород, створ 3 (11,2 км выше устья

р. Нарвы, 5,0 км ниже Нарвской ГЭС). Протяжённость р. Нарвы 77 км. Река относительно полноводная (средний годовой сток 12,5 км³), по величине стока является второй после Невы рекой, впадающей в Финский залив Балтийского моря. Кроме того р. Нарва является источником водоснабжения г. Нарвы (Эстония) и г. Ивангорода (Россия), что также обуславливает необходимость развития комплексных методов оценки качества вод и здоровья её водных экосистем.

Определение экологического состояния в изучаемой локации (ниже г. Ивангорода) осуществлялось комплексно и в нескольких направлениях исследований. В первую очередь, проводили анализ мониторинговых данных по химическому составу воды и оценке уровня загрязнения в створе реки (данные ФГБУ «Северо-Западное Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС)» за 2018–2020 гг.), что позволило оценить состояние качества вод в изучаемом участке р. Нарвы выше спуска вод Муниципальных очистных сооружений ООО «Ивангородский водоканал» г. Ивангорода.

Во-вторых, определяли загрязнение седиментов в локации исследования, с акцентом на наличие и концентрацию тяжёлых металлов (ТМ), имеющих преимущественное значение для биоты, а именно Cu, Cd, Ni, Zn, Pb. Исследуемый материал представлял собой пробы верхнего слоя донных отложений (0–5 см), отобранные вручную. Пробы были собраны примерно в 10 м от берега на глубине 0,7–0,8 м. Анализ проб проводили в лаборатории ЗАО «Региональный аналитический центр Механобр инжиниринг аналит» (г. Санкт-Петербург). Применённые методы анализа соответствовали ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98, п. 5.2.1 – атомно-эмиссионный метод с индуктивно связанной плазмой. Измерения проводили на атомно-эмиссионном спектрометре ICAР7200duo (США) в двух повторностях. Погрешность измерения составляла не более 10%.

В-третьих, определяли аккумуляцию Cu, Cd, Ni, Zn, Pb в мягких тканях моллюсков семейства Unionidae (а именно, *Unio pictorum*) в той же лаборатории методами, обозначенными выше. Концентрации металлов определяли тотально (без выделения специальных органов и тканей), в каждой пробе были мягкие ткани шести моллюсков. Вычисляли коэффициент (фактор) биоконцентрации ТМ (BCF) согласно общепринятой формуле [8]:

$$BCF = \frac{C_{mollusk}}{C_{sediment}},$$

где $C_{mollusk}$ – концентрация ТМ в тканях моллюсков (мкг/г), $C_{sediment}$ – концентрация ТМ в седиментах (мкг/г).

В-четвертых, определяли относительную численность углеводород-(УВ)-окисляющих бактерий в пищеварительном тракте *U. pictorum*, что является индикатором загрязнения вод и донных отложений нефтепродуктами [9].

В-пятых, оценивали функциональное состояние массового представителя местной биоты – пресноводного двустворчатого моллюска *U. pictorum*, накапливающего большие количества загрязняющих веществ, как из придонного слоя воды, так и из седиментов. Моллюсков 4–5 лет, близких по длине раковины, собирали на мелководном природном песчаном пляже в конце июля 2020 г. Координаты места сбора седиментов и моллюсков – 59°23'50.2" с. ш., 28°41'51.0" в.д., это ближайшая к створу № 3 локация.

Моллюски были собраны (рис. 1) и доставлены в лабораторию в изотермных полиэтиленовых пакетах вместе с 12 л речной воды, помещены в стеклянные аквариумы с аэрируемой речной водой. После суточной акклимации к лабораторным условиям и установки на раковины миниатюрных держателей датчиков у моллюсков в течение нескольких часов были зарегистрированы фоновые характеристики работы их кардиосистемы – частота сердечных сокращений (ЧСС), вариабельность кардиоритма. Программно рассчитывали среднеквадратичное отклонение (СКО) ЧСС для группы моллюсков. Далее проведён эксперимент с изменениями солёности воды как фактора, вызывающего дополнительную функциональную нагрузку на физиологические системы моллюска.

Ниже приведена блок-схема установки для неинвазивной регистрации активности сердца моллюсков (рис. 2).

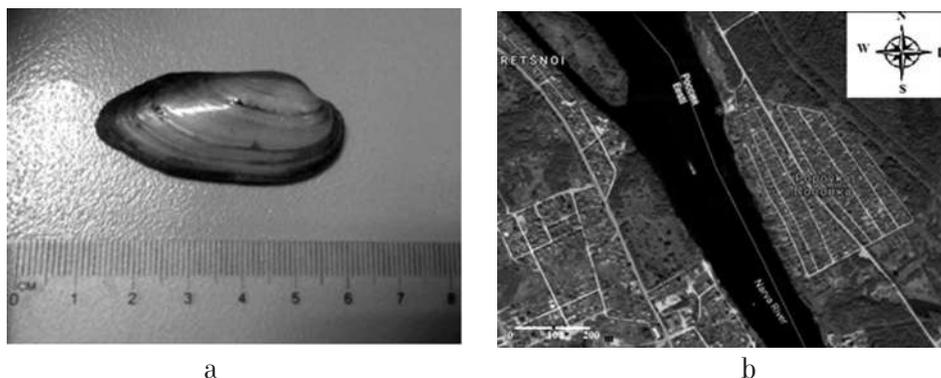


Рис. 1. Изучаемые моллюски *Unio pictorum* (a); карта места сбора моллюсков (b)
 Fig. 1. The studied mollusks *Unio pictorum* (a); mollusk collection site map (b)

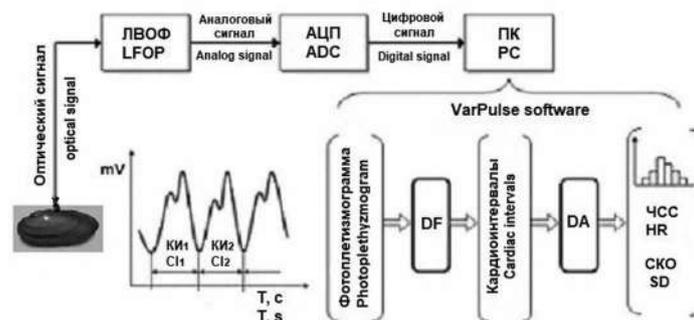


Рис. 2. Блок-схема установки по неинвазивной регистрации кардиоритма с основными этапами обработки данных. Обозначения: ЛВОФ – лазерный волоконно-оптический фотоплетизмограф, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, ПК – персональный компьютер; DF – цифровой фильтр и DA – анализ распределений. Основные этапы математической обработки выборки кардиоинтервалов (обычно не менее 50) для получения характеристик: средняя величина кардиоинтервалов (ЧСС), среднее квадратичное отклонение (СКО) / Fig. 2. Block diagram of the installation for non-invasive cardiac rhythm recording with the main stages of data processing. LFOP – laser optic-fiber photoplethysmograph, ADC – analog-to-digital converter; PC – personal computer; DF – digital filter; DA – distribution analysis. The main stages of processing of a sample of cardiac intervals (usually, at least 50) to obtain: HR – heart rate; SD – standard deviation

В данном разделе работы использовали систему неинвазивной опто-волоконной регистрации кардиоритма беспозвоночных с экзоскелетом и разработанную и апробированную ранее методику тестирования функционального состояния моллюсков [6, 7, 10, 11] по скорости восстановления кардиоритма после применения функциональных нагрузок, что характеризует общие адаптационные возможности организма, то есть меру их здоровья.

Анализ кардиоритма проводили по показателям ЧСС, которые представляли как вычисляемые программно средние значения ($ЧСС_{ср}$) и их стандартные ошибки в выборке из 50 кардиоинтервалов. В предлагаемой процедуре тестирования адаптационных возможностей унионид используется методология, учитывающая такие параметры адаптивности организма, как время восстановления сердечного ритма ($T_{восст}$, мин) и вариабельность ЧСС после нагрузки (изменения солёности воды).

Величина, на которую повышали солёность воды в аквариуме с моллюсками, была выбрана нами в 8 ‰ (добавлением в аквариум 8 г/л NaCl) с часовой экспозицией (гиперосмотическое воздействие) именно из соображений, чтобы не «запустить» необратимые биохимические изменения, но вызвать временное напряжение адаптивных систем организма [11, 12]. Природная солёность воды в 6–8 ‰ является верхней границей солеустойчивости пресноводных беспозвоночных [13].

Результаты и обсуждение

Согласно задачам работы были систематизированы данные ФГБУ «Северо-Западное УГМС» по основным гидрохимическим показателям воды ниже г. Ивангорода за 3 года. Данные представлены в таблице 1.

Кислородный режим за период наблюдений – удовлетворительный. Концентрация хлорорганических пестицидов – ниже порога обнаружения; рН варьирует в зависимости от сезона года – 7,0–8,2. Комплексный показатель степени загрязнённости вод (УКИЗВ) в створе № 3 колеблется в пределах 1,94–2,17. Воды р. Нарвы в 2019 г. в створе № 3 в соответствии с РД 52.24.643-2002 характеризовались как слабо загрязнённые (2 класс качества), в 2020 г. – как загрязнённые (3 класс, разряд «а»). Такое изменение качества природных вод р. Нарвы может быть объяснено реконструкцией причала береговой охраны г. Иванго-

рода и повышением количества взвешенных веществ в воде реки, что носит временный характер.

Результаты атомно-адсорбционного анализа пробы седиментов на ТМ представлены в таблице 2. Было показано, что ТМ в седиментах значительно меньше, чем в аналогичных пробах из восточной части Финского залива Балтийского моря [17], что также подтверждает хороший статус изучаемой акватории.

Содержание ТМ в тканях моллюсков ($n = 6$) представлено в таблице 2. Концентрации ТМ в моллюсках *U. pictorum* составили следующий восходящий ряд: $Cd < Pb < Ni < Cu < Zn$.

Полученные данные показали, что моллюски из р. Нарвы накапливают Zn и Cu. Однако эти металлы являются необходимыми элементами в жизнедеятельности моллюсков, и в наблюдаемых концентрациях они не опасны для биоты [18].

Высокий коэффициент биоаккумуляции для Zn в пресноводных моллюсках был отмечен ранее рядом авторов для акваторий Финского залива Балтийского моря [17]. Все ТМ и в тех концентрациях, которые были получены нами в ходе исследования, не являются для моллюсков губительными (для сравнения см., например, [17, 19]). Это утверждение авторов также доказывает и существование устойчивой популяции этих двустворчатых моллюсков *U. pictorum* на изученном участке р. Нарвы.

В ходе мониторинга кардиоритма моллюсков без воздействия было обнаружено, что средние значения фоновых ЧСС для группы унионид ($n = 16$) составляли $18,6 \pm 3,0$ уд/мин, вариабельность кардиоритма была небольшой и составляла менее 10% в состоянии активной фильтрации моллюсками воды; последнее мы регистрировали визуально.

В ходе процедуры тестирования функционального состояния моллюсков (адаптивности их кардиосистемы к нагрузкам) были получены данные, представленные на рисунке 3, а время восстановления не превышало 60 мин, что характерно для моллюсков из чистых мест обитания [10, 11].

Принимая во внимание результаты тестирования моллюсков, мы можем сделать вывод, что р. Нарву (в исследуемом участке) можно отнести к относительно чистому месту, поскольку обитающие здесь двустворчатые моллюски имели хороший физиологический статус: они быстро восстанавливали свой кардиоритм после снятия нагрузки.

Таблица 1 / Table 1

Основные гидрохимические показатели воды р. Нарвы ниже г. Ивангорода (створ № 3) за 2018–2020 гг. [14–16] / The main hydrochemical indicators below Ivangorod (gate No. 3) for 2018–2020 [14–16]

Показатель Parameter	Единицы измерения Units	Год / Year		
		2018	2019	2020
Взвешенные вещества Suspended substances	мг/дм ³ mg/dm ³	3,75	4,92	7,00
Растворённый кислород Dissolved oxygen	мг/дм ³ mg/dm ³	10,4	10,2	10,6
Окисляемость бихроматная Bichromate oxidation	мгО/дм ³ mgO/dm ³	33,8	31,2	31,3
БПК ₅ / BOD ₅	мгО ₂ /дм ³ mgO ₂ /dm ³	0,842	1,23	1,55
NH ₄ ⁺ (по N)	мг/дм ³ mg/dm ³	0,013	0,018	0,023
NO ₂ ⁻ (по N)	мг/дм ³ mg/dm ³	0	0	0,011
NO ₃ ⁻ (по N)	мг/дм ³ mg/dm ³	0,109	0,115	0,081
Фосфаты (P) Phosphates (P)	мг/дм ³ mg/dm ³	0,007	0,008	0,006
Фосфор общий Total phosphorus	мг/дм ³ mg/dm ³	0,036	0,018	0,016
Азот общий растворённый Total soluble nitrogen	мг/дм ³ mg/dm ³	–	0,670	1,00
Железо общее Total iron	мг/дм ³ mg/dm ³	0,058	0,076	0,036
Медь / Copper	мкг/дм ³ µg/dm ³	3,91	3,56	3,85
Цинк / Zinc	мкг/дм ³ µg/dm ³	31,7	11,6	11,0
Никель / Nickel	мкг/дм ³ µg/dm ³	0,625	1,12	1,12
Хром общий / Total chrome	мкг/дм ³ µg/dm ³	0,083	0	0
Свинец / Lead	мкг/дм ³ µg/dm ³	0	0,317	0,367
Кадмий / Cadmium	мкг/дм ³ µg/dm ³	0,108	0,125	0,475
Марганец / Manganese	мкг/дм ³ µg/dm ³	1,33	5,67	2,65
Нефтепродукты / Oil products	мг/дм ³ mg/dm ³	0,007	0,017	0,001
Анионные синтетические поверхностно-активные вещества Anionic synthetic surfactants	мг/дм ³ mg/dm ³	0,002	0,007	0,029

Примечание: (–) нет данных.
Note: (–) no data available.

Для оценки возможного загрязнения данного участка реки нефтепродуктами и влияния на местную биоту использовали метод микробной индикации, основанный на увеличении численности микроорганизмов-деструкторов углеводов под действием загрязнения.

Микробиологические исследования показали, что средняя численность УВ-окисляющих бактерий в пищеварительном тракте моллюсков, отобранных в Ивангороде вблизи створа № 3 на р. Нарве ($1,25 \cdot 10^4$ КОЕ/г), была сопоставима с численностью этой группы бактерий

Таблица 2 / Table 2

Содержание некоторых тяжёлых металлов (ТМ) в осадках р. Нарвы и в мягких тканях моллюсков *Unio pictorum* / Heavy metal content in the sediments of the Narva River and in soft tissues of mollusk *Unio pictorum*

Металлы Metals	Содержание ТМ в осадках, мкг/г Heavy metal content in sediments, µg/g	Содержание ТМ в мягких тканях моллюсков, мкг/г Heavy metal content in soft tissues of mollusks, µg/g	Фактор биоконцентрации BCF
Hg	0,0088	–	–
Ni	2,6±0,25	3,5±0,2	1,35
Cu	2,8±0,5	7,0±0,7	2,5
Zn	16,3±1,6	162,0±16,0	9,94
Cd	0,03±0,01	0,046±0,01	1,53
Pb	0,32±0,03	0,5±0,05	1,56

Примечание: (–) содержание ртути не определялось.
Note: (–) mercury content was not determined.

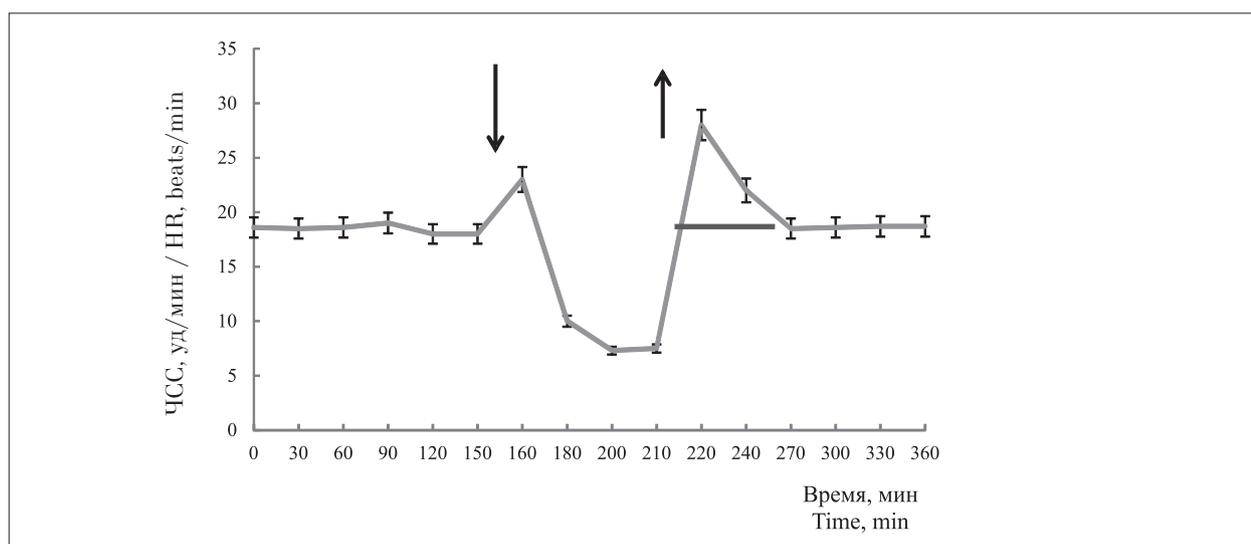


Рис. 3. Фоновая ЧСС моллюсков; её изменения в ходе соленосной нагрузки (начало и конец указаны стрелками) и восстановительного периода (отмечен красным отрезком)
Fig. 3. Background HR of mollusks; its changes under altered salinity (beginning and end indicated by arrows) and in recovery period (marked red)

($1,08 \cdot 10^4$ КОЕ/г) в пищеварительном тракте моллюсков, обитающих в восточной части Финского залива на станции Дубки (рис. 4а). Проведённые ранее исследования прибрежной зоны восточной части Финского залива выявили более низкий уровень антропогенного воздействия на данную часть побережья (Дубки), по сравнению с другими станциями наблюдения [20].

Расчёт относительной численности УВ-окисляющих бактерий в пищеварительном тракте моллюсков *U. pictorum* подтвердил полученные результаты (рис. 4б). Данный показатель колебался в пределах от 0,3 до 1,8% от общего числа гетеротрофных микроорганизмов, что характерно для незагрязнённых нефтепродуктами вод [20].

Заклучение

Применённый комплексный подход к оценке качества воды реки, осадков и состояния представителей местной биоты (двустворчатых моллюсков) позволил охарактеризовать природные воды в данном участке реки как умеренно загрязнённые.

Было установлено, что среди изученных ТМ в максимальных концентрациях донные осадки накапливали Zn, затем Cu, в меньшей степени Pb, Cd и Ni.

Выявлены различия в накоплении анализируемых ТМ бентосными организмами, в частности, двустворчатыми моллюсками *U. pictorum*. По сравнению с осадками мягкие ткани моллюска *U. pictorum* являются

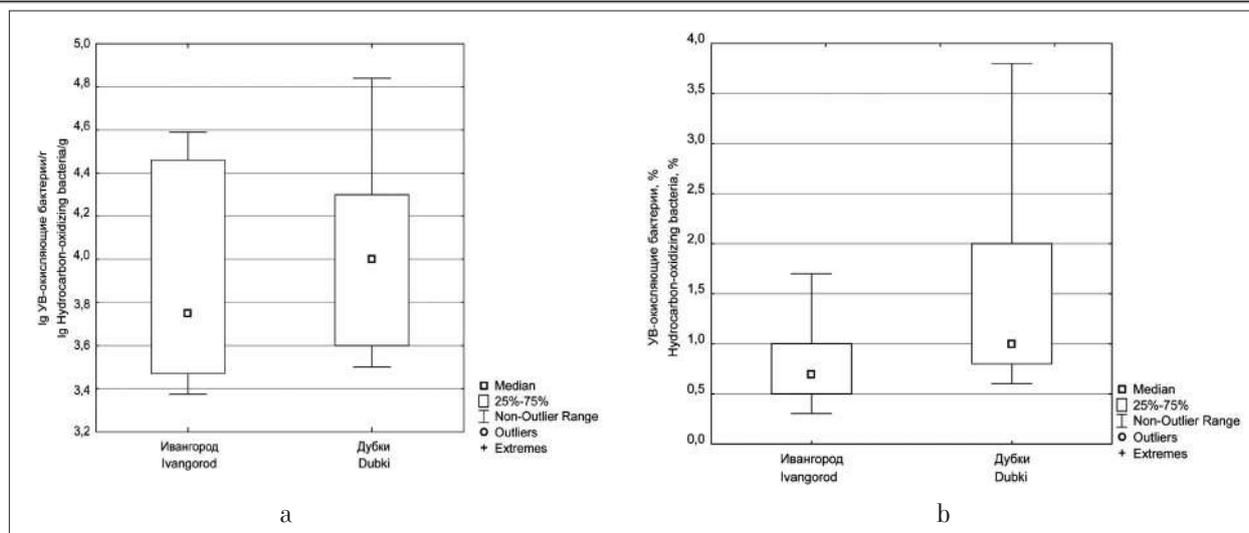


Рис. 4. Численность УВ-окисляющих бактерий (а) и относительная численность УВ-окисляющих бактерий (б) в пищеварительном тракте *Unio pictorum*, обитающих в реке Нарве (Ивангород) и прибрежной зоне восточной части Финского залива (Дубки)

Fig. 4. The number of hydrocarbon-oxidizing bacteria (a) and the relative number of hydrocarbon-oxidizing bacteria (b) in the digestive tract of *Unio pictorum* from the Narva River (Ivangorod) and the coastal zone of the Eastern Gulf of Finland (Dubki)

концентраторами ТМ: Zn (в 10 раз больше), Cu (в 2,5 раза), Ni и Cd (около 1,5 раз).

Выявленные концентрации ТМ в тканях изученного вида моллюсков не оказывают губительного действия на их организм. Функциональное состояние моллюсков *U. pictorum* в проведённых физиологических опытах с регистрацией показателей работы кардиосистемы оказалось хорошим, так как животные быстро восстанавливали кардиоритм после отмены функциональной экспериментальной нагрузки при возвращении их в природную воду.

Данные микробной индикации указывают на низкий уровень загрязнения воды участка р. Нарвы на территории России нефтепродуктами и дополняют результаты, полученные ранее при изучении относительного обилия углеводородокисляющих бактерий в пищеварительном тракте морских животных и донных отложениях восточной части Финского залива [9, 20].

Результаты настоящего исследования могут быть полезны при разработке комплексных методов оценки качества природных вод и функционального состояния (здоровья) водных экосистем, а также для оценки экологических рисков и планирования природоохранных мероприятий.

Литература

1. Водные ресурсы и качество вод: состояние и проблемы управления / Отв. ред. В.И. Данилов-Данильян,

В.Г. Пряжинская М.: Российская академия сельскохозяйственных наук, 2010. 415 с.

2. Моисеенко Т.И. Водная экотоксикология: теоретические и прикладные аспекты. М.: Наука, 2009. 399 с.

3. Reynoldson T.B., Norris R.H., Resh V.H., Day K.E., Rosenberg D.M. The reference condition: a comparison of multimetric and multivariate approaches to assess water-quality impairment using benthic macroinvertebrates // Journal of North American Benthological Society. 1997. V. 16. No. 4. P. 833–852. doi: 10.2307/1468175

4. Depledge M.H., Galloway T.S. Healthy animals, healthy ecosystems // Frontiers in Ecology and the Environment. 2005. V. 3. No. 5. P. 251–257. doi: 10.1890/1540-9295(2005)003[0251:НАНЕ]2.0.CO;2

5. Экосистема эстуария реки Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы / Под ред. А.Ф. Алимова, С.М. Голубкова. М.; СПб.: Товарищество науч. изд. КМК, 2008. 477 с.

6. Холодкевич С.В., Иванов А.В., Трусевич В.В., Кузнецова Т.В. Экотоксикологический биомаркер для биоиндикации состояния водных экосистем на основе оценки адаптационной способности обитающих в них двустворчатых моллюсков // Доклады Национальной академии наук Украины. 2012. № 6. С. 138–142.

7. Камардин Н.Н., Холодкевич С.В., Макеева В.М. Мониторинг парков прибрежной зоны Невской губы с помощью моллюска *Arianta arbustorum* // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 75–81. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-075-081

8. Mendoza-Carranza M., Sepúlveda-Lozada A., Dias-Ferreira C., Geissen V. Distribution and bioconcentration of heavy metals in a tropical aquatic food web: A case study of a tropical estuarine lagoon in SE Mexico // Environ-

mental Pollution. 2016. V. 210. P. 155–165. doi: 10.1016/j.envpol.2015.12.014

9. Polyak Y.M., Berezina N.A., Poley D.E., Sharov A.N. The state of the intestinal bacterial community in mollusks for assessing habitat pollution in the Gulf of Finland (Baltic Sea) // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2022. V. 278. Article No. 108095. doi: 10.1016/j.ecss.2022.108095

10. Turja R., Lehtonen K.K., Höher N., Snoeijs P., Baršienė J., Butrimavičiene L., Kuznetsova T., Kholodkevich S.V., Devier M.H., Budzinski H. A multibiomarker approach to the assessment of pollution impacts in two Baltic Sea coastal areas in Sweden using caged mussels (*Mytilus trossulus*) // The Science of the Total Environment. 2014. V. 473–474. P. 398–409. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.12.038

11. Kuznetsova T., Kholodkevich S. Comparative assessment of surface water quality through evaluation of physiological state of bioindicator species: searching a new biomarkers // Proceedings 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing. Budva, Montenegro, 14–18 June, 2015. P. 339–344. doi: 10.1109/MECO.2015.7181938

12. Кузнецова Т.В., Холодкевич С.В., Манвелова А.Б., Фрумин Г.Т. Некоторые проблемы и пути их решения при выборе референтных мест и референтных значений в оценке состояния акваторий восточной части Финского залива // Региональная экология. 2019. № 3 (57). С. 102–114. doi: 10.30694/1026-5600-2019-3-102-114

13. Комендантов А.Ю., Хлебович В.В., Аладин Н.В. Особенности осмотической и ионной регуляции двусторчатых моллюсков в зависимости от факторов среды // Экология. 1985. № 5. С. 39–46.

14. Ежегодник качества поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям на территории деятельности ФГБУ «Северо-Западное УГМС» (Санкт-Петербург, Ленинградская, Новгородская, Псковская области и республика Карелия) 2018 год. Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», 2019. 504 с.

15. Ежегодник качества поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям на территории деятельности ФГБУ «Северо-Западное УГМС» (Санкт-Петербург, Ленинградская, Новгородская, Псковская области и республика Карелия) 2019 год. Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», 2020. 569 с.

16. Ежегодник качества поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям на территории деятельности ФГБУ «Северо-Западное УГМС» (Санкт-Петербург, Ленинградская, Новгородская, Псковская области и республика Карелия) 2020 год. Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», 2021. 746 с.

17. Levit R.L., Shigaeva T.D., Kudryavtseva V.A. Heavy metals in macrozoobenthos and sediments of the coastal zone of the eastern Gulf of Finland // Russian Journal of General Chemistry. 2020. V. 90. No. 13. P. 2700–2707. doi: 10.1134/S1070363220130265

18. Моисеенко Т.И. Биодоступность и экотоксичность металлов в водных системах: критические уровни загрязнения // Геохимия. 2019. Т. 64. № 7. С. 675–688. doi: 10.31857/S0016-7525647675-688

19. Zarykhta V.V., Zhang Z., Kholodkevich S.V., Kuznetsova T.V., Sharov A.N., Zhang Y., Sun K., Lv M., Feng Y. Comprehensive assessments of ecological states of Songhua River using chemical analysis and bivalves as bioindicators // Environmental Science and Pollution Research. 2019. V. 26. No. 32. P. 33341–33350. doi: 10.1007/s11356-019-06349-7

20. Polyak Yu.M., Demchuk A.S., Sharov A.N., Gubelit Yu.I., Berezina N.A. Hydrocarbon-oxidizing bacteria in the digestive system of fish as an indicator of coastal pollution // Doklady Biological Sciences. 2020. V. 491. No. 1. P. 71–74. doi: 10.1134/S001249662002009X

References

1. Water resources and water quality. Management status and problems / Eds. V.I. Danilov-Danilyan, V.G. Priazhinskaya. Moskva: Rossiyskaya akademiya selskokhozyaystvennykh nauk, 2010. 415 p. (in Russian).

2. Moiseenko T.I. Aquatic ecotoxicology: theoretical and applied aspects. Moskva: Nauka, 2009. 399 p. (in Russian).

3. Reynoldson T.B., Norris R.H., Resh V.H., Day K.E., Rosenberg D.M. The reference condition: a comparison of multimetric and multivariate approaches to assess water-quality impairment using benthic macroinvertebrates // Journal of North American Benthological Society. 1997. V. 16. No. 4. P. 833–852. doi: 10.2307/1468175

4. Depledge M.H., Galloway T.S. Healthy animals, healthy ecosystems // Frontiers in Ecology and the Environment. 2005. V. 3. No. 5. P. 251–257. doi: 10.1890/1540-9295(2005)003[0251:HAHE]2.0.CO;2

5. Ecosystem of the Neva River Estuary: Biological diversity and environmental problems / Eds. A.F. Alimov, S.M. Golubkov. Moskva, Sankt-Peterburg: KMK Publ., 2008. 477 p. (in Russian).

6. Kholodkevich S., Ivanov A.V., Trusevich V.V., Kuznetsova T.V. Ecotoxicological biomarker for bioindication of the state of aquatic ecosystems based on the assessment of the adaptive capacity of bivalve mollusks living in them // Doklady Natsional'noi akademii nauk Ukrainy. 2012. No. 6. P. 138–142 (in Russian).

7. Kamardin N.N., Kholodkevich S.V., Makeeva V.M. Monitoring of parks in the coastal zone of the Neva Bay with the snail *Arianta arbustorum* // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 75–81 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-075-081

8. Mendoza-Carranza M., Sepúlveda-Lozada A., Dias-Ferreira C., Geissen V. Distribution and bioconcentration of heavy metals in a tropical aquatic food web: A case study of a tropical estuarine lagoon in SE Mexico // *Environmental Pollution*. 2016. V. 210. P. 155–165. doi: 10.1016/j.envpol.2015.12.014
9. Polyak Y.M., Berezina N.A., Polev D.E., Sharov A.N. The state of the intestinal bacterial community in mollusks for assessing habitat pollution in the Gulf of Finland (Baltic Sea) // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2022. V. 278. Article No. 108095. doi: 10.1016/j.eess.2022.108095
10. Turja R., Lehtonen K.K., Höher N., Snoeijs P., Baršienė J., Butrimavičiene L., Kuznetsova T., Kholodkevich S.V., Devier M.H., Budzinski H. A multibiomarker approach to the assessment of pollution impacts in two Baltic Sea coastal areas in Sweden using caged mussels (*Mytilus trossulus*) // *The Science of the Total Environment*. 2014. V. 473-474. P. 398–409. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.12.038
11. Kuznetsova T., Kholodkevich S. Comparative assessment of surface water quality through evaluation of physiological state of bioindicator species: searching a new biomarkers // *Proceedings 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing*. Budva, Montenegro, 14–18 June, 2015. P. 339–344. doi: 10.1109/MECO.2015.7181938
12. Kuznetsova T.V., Kholodkevich S.V., Manvelova A.B., Frumin G.T. Some problems and approaches for their solution in searching reference sites and reference values in assessing the ecological state of aquatoria in the Eastern Gulf of Finland // *Regional'naya ekologiya*. 2019. No. 3 (57). P. 102–114 (in Russian). doi: 10.30694/1026-5600-2019-3-102-114
13. Komendantov A.Yu., Khlebovich V.V., Aladin N.V. Features of osmotic and ionic regulation of bivalve mollusks depending on environmental factors // *Ecology*. 1985. No. 5. P. 39–46 (in Russian).
14. Yearbook of surface water quality by hydrochemical indicators in the territory of the activity of the North-Western UGMS Federal State Budgetary Institution (St. Petersburg, Leningrad, Novgorod, Pskov Regions and the Republic of Karelia) 2018. Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe uchrezhdenie "Severo-Zapadnoe upravlenie po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy", 2019. 504 p. (in Russian).
15. Yearbook of surface water quality by hydrochemical indicators in the territory of the activity of the North-Western UGMS Federal State Budgetary Institution (St. Petersburg, Leningrad, Novgorod, Pskov Regions and the Republic of Karelia) 2019. Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe uchrezhdenie "Severo-Zapadnoe upravlenie po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy", 2020. 569 p. (in Russian).
16. Yearbook of surface water quality by hydrochemical indicators in the territory of the activity of the North-Western UGMS Federal State Budgetary Institution (St. Petersburg, Leningrad, Novgorod, Pskov Regions and the Republic of Karelia) 2020. Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe uchrezhdenie "Severo-Zapadnoe upravlenie po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy", 2021. 746 p. (in Russian).
17. Levit R.L., Shigaeva T.D., Kudryavtseva V.A. Heavy metals in macrozoobenthos and sediments of the coastal zone of the Eastern Gulf of Finland // *Russian Journal of General Chemistry*. 2020. V. 90. No. 13. P. 2700–2707. doi: 10.1134/S1070363220130265
18. Moiseenko T.I. Bioavailability and ecotoxicity of metals in aquatic systems: critical levels of pollution // *Geohimia*. 2019. V. 64. No. 7. P. 675–688 (in Russian). doi: 10.31857/S0016-7525647675-688
19. Zarykhta V.V., Zhang Z., Kholodkevich S.V., Kuznetsova T.V., Sharov A.N., Zhang Yu., Sun K., Lv M., Feng Y. Comprehensive assessments of ecological states of Songhua River using chemical analysis and bivalves as bioindicators // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. V. 26. No. 32. P. 33341–33350. doi: 10.1007/s11356-019-06349-7
20. Polyak Yu.M., Demchuk A.S., Sharov A.N., Gubelit Yu.I., Berezina N.A. Hydrocarbon-oxidizing bacteria in the digestive system of fish as an indicator of coastal pollution // *Doklady Biological Sciences*. 2020. V. 491. No. 1. P. 71–74. doi: 10.1134/S001249662002009X