

Сравнительная оценка экологического состояния различных локаций реки Луги

© 2025. Т. В. Кузнецова¹, к. б. н., с. н. с.,

А. Б. Манвелова¹, н. с., Л. Л. Капранова², к. б. н., с. н. с.,

¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, 199178, Россия, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., д. 39,

²Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского Российской академии наук», 299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2,
e-mail: kuznetsova_tv@bk.ru

На основе комплексной оценки показателей качества водной среды, данных по содержанию тяжёлых металлов в донных отложениях и тканях двустворчатых моллюсков *Unio pictorum*, а также о физиологическом статусе (индексы состояния) моллюсков были исследованы 7 локаций р. Луги. Выявлены различия физико-химических характеристик качества природных вод, различия в содержании и бионакоплении тяжёлых металлов, как основных загрязнителей водных экосистем. Максимальные концентрации тяжёлых металлов в донных отложениях были характерны для Zn, затем Pb, меньшие – для Cu и Cd, вне зависимости от локаций наблюдения. Коэффициент бионакопления тяжёлых металлов в мягких тканях моллюсков был максимальным для Zn, в меньшей степени – для Cu и Cd, и минимальны для Pb. Сравнительный анализ индексов состояния (здоровья) моллюсков, вычисленный с использованием различных морфометрических и массовых параметров, показал эффективность применения такого подхода в оценке экологического состояния изучаемых водных экосистем по показателям состояния местной биоты.

Ключевые слова: комплексная оценка экологического состояния, физико-химические показатели качества воды, тяжёлые металлы, донные отложения, ткани моллюсков, индексы состояния (здоровья) двустворчатых моллюсков.

Comparative assessment of the environmental status of the Luga River locations

© 2025. T. V. Kuznetsova¹ ORCID: 0000-0002-4848-1806[†]

A. B. Manvelova¹ ORCID: 0000-0003-0628-7033[†]

L. L. Kapranova² ORCID: 0000-0001-9081-1074[†]

¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 39, 14 line V.I., Saint Petersburg, Russia, 199178,

²A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of the Russian Academy of Sciences, 2, Nakhimova av., Sevastopol, Russia, 299011,
e-mail: kuznetsova_tv@bk.ru

We have conducted a comprehensive assessment of the ecological status of the Luga River locations. The analysis was based on aquatic environment quality indicators, and data on heavy metal content in bottom sediments and tissues of indigenous bivalve mollusks *Unio pictorum* L. (Mollusca, Bivalvia), as well as on the mollusks' physiological status (Condition Index – CI) in 7 locations of the Luga River. Differences in the physicochemical characteristics of surface water quality and heavy metal content and bioaccumulation were revealed. The maximum heavy metal concentrations in bottom sediments were typical for Zn and Pb, lower – for Cu and Cd, regardless of the sampling site. The heavy metal's bioaccumulation coefficient in mollusk soft tissues was maximum for Zn, to a lesser extent for Cu and Cd, and minimum for Pb. The minimum CI values were obtained for the sampling site below Tolmachevo, the maximum – for the sampling site below confluence of the Solka and the Luga rivers. A small population of mollusks has been identified within the city of Luga. This may be due to the low dissolved oxygen content in the water in addition to environmental pollution. The CI (general health status) was calculated using various morphometric and mass parameters of mollusks sampled in different locations. A comparative analysis of the CI showed the effectiveness of this approach in assessing the ecological status of the studied aquatic ecosystems based on the status of the local biota.

Keywords: comprehensive assessment of the ecological status, physicochemical indicators of water quality, heavy metals, sediments, tissues of mollusks, condition (general health status) indexes of bivalves.

Река Луга – самая протяжённая в Ленинградской области (353 км), площадь водосбора 13200 км². В реку впадает множество рек более мелкого порядка и ручьёв. На водотоке происходят существенные колебания скорости течения воды (0,1–0,5 м/с).

В районе городов Луга и Кингисепп река испытывает антропогенную нагрузку, включая как сельскохозяйственную, так и селитебную: в первую очередь, от поступающих сбросов сточных вод предприятий водопроводно-канализационного хозяйства, промышленных предприятий, а также поверхностный сток с водосбора. Особенно интенсивно промышленно развивается территория в западной части бассейна р. Луги [1].

Заметное влияние на экологическое состояние реки оказывают и уже действующие многие годы промышленные объекты, основным из которых является предприятие ООО «ПГ» «Фосфорит» – один из ведущих производителей фосфорных удобрений и кормовых фосфатов на Северо-Западе России, а также фосфоритной муки, серной и фосфорной кислот. Предприятиями, осуществляющими сброс загрязнённых сточных вод в поверхностные воды в бассейне р. Луги, также являются ОАО «Кингисеппский водоканал», ГУП «Леноблводоканал», ОАО «Коммунальные системы Гатчинского района» (пос. Сиверский, Вырица, Рождествено и др.), а также предприятия пищевой, металлообрабатывающей промышленности и др. Значительные площади территории заняты сельскохозяйственными угодьями, что обуславливает повышенный сток биогенных элементов. Всё это оказывает и будет оказывать влияние на состояние водной экосистемы р. Луги.

По данным Северо-Западного Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗУГМС), воды реки в зависимости от участка согласно РД 52.24.643-2002 в период 2020–2023 гг. относятся к загрязнённым и очень загрязнённым, класс качества воды – За и Зб, соответственно. Основными загрязняющими веществами являются медь (Cu), марганец (Mn) и азот нитритный (N-NO₂). К показателям, среднегодовая концентрация которых за исследуемый период стабильно превышает нормативы, также относятся ХПК, железо общее [2].

Целью работы являлось проведение комплексной оценки экологического состояния различных локаций р. Луги с использованием разных методических подходов и оценочных критериев.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлась р. Луга. Исследуемые участки акватории р. Луги были приурочены к ближайшим постам государственного экологического мониторинга СЗУГМС в её бассейне. Внимание уделяли локациям с наличием там двустворчатых моллюсков – биоиндикаторов качества природных вод.

Пробы для оценки физико-химических характеристик качества вод отбирали с глубины от 0,5 до 1,0 м батометром и смешивали их до образования интегральной пробы, которая и подвергалась анализу в день отбора проб.

Отбор донных отложений проводили с глубины 0,5–0,7 м в местах отбора моллюсков. В местах отбора проб дно, как правило, покрыто песчаными, песчано-илистыми или песчано-глинистыми отложениями.

Пресноводных двустворчатых моллюсков семейства Unionidae (**Mollusca, Bivalvia**) активно используют в экологическом мониторинге состояния водоёмов, а именно, в качестве биоиндикаторных организмов, умеренно чувствительных к воздействию различного рода загрязнителей. Так, *Unio pictorum* (Linnaeus, 1758) – традиционный биоиндикатор при мониторинге экологического состояния пресноводных экосистем Северо-Запада России [3, 4]. Этот вид считают более чувствительными к загрязнению, чем близкородственный *Unio tumidus* [5], вид, также широко распространённый в этом регионе России.

В данном исследовании по морфометрическим показателям (длина, высота, ширина раковины, общая масса моллюска, масса его мягких тканей, масса раковины) оценивали индекс состояния (здоровья) – CI (Condition Index) местных моллюсков, который отражает физиологические и биоэнергетические изменения в организме [6]. Этот показатель косвенно указывает на качество среды обитания моллюсков.

Карта мест отбора проб воды и донных отложений, а также моллюсков представлена на рисунке 1.

В 2023 г. вода на всех станциях по химическому составу характеризуется как загрязнённая [2].

Станция 1 – выше г. Луги, 1,5 км, выше впадения р. Вревки, левый берег реки, дно песчаное, по кромке берега небольшое количество тростника *Phragmites australis*, моллюсков более 5 экз./м²; показателями, вносящими

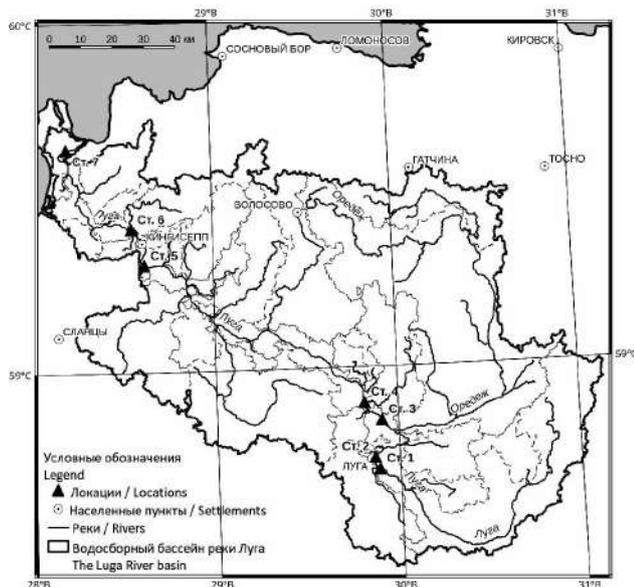


Рис. 1. Карта бассейна р. Луги и мест сбора проб (отмечены чёрными треугольниками)
Fig. 1. Map of the Luga River basin and sampling sites (indicated by black triangles)

основной вклад в загрязнение вод, являются ХПК, железо общее и медь [2];

Станция 2 – в черте г. Луга, городской пляж, правый берег реки, дно песчано-илистое, растительность – рдест *Potamogeton natans*, по берегу кусты *Salix caprea*, моллюски *Unio* обнаружены в единичном количестве; среднегодовые значения показателей в воде выше нормы наблюдаются по ХПК и меди;

Станция 3 – выше пос. Толмачево, ниже впадения р. Оредеж, правый берег, дно песчано-глинистое, растительность – *P. australis* и *Elodea canadensis*, моллюсков 10–12 экз./м²; превышение нормативов отмечается по среднегодовым концентрациям ХПК, железа общего и меди;

Станция 4 – ниже пос. Толмачево, ниже впадения р. Ящеры, дно песчано-илистое, моллюски *Unio* с редкими дрейссенами *Dreissena polymorpha* на раковинах унионид, плотность популяции более 10 экз./м²; основные загрязняющие вещества – железо общее, медь, наблюдается превышение нормативов по ХПК;

Станция 5 – выше г. Кингисеппа, выше впадения р. Славянки, левый берег, песчаный пляж, стрелолист *Sagittaria natans* и рдест *P. natans*. Вода заметно холоднее, чем в других изученных локациях р. Луги; моллюски 8 экз./м²; показателями, вносящими основной вклад в загрязнение вод, являются ХПК, железо общее, медь и марганец.

Станция 6 – ниже г. Кингисеппа, ниже впадения р. Солки, правый берег, дно преи-

мущественно песчано-глинистое со следами отмершей водной растительности, рдест *P. natans*; плотность популяции моллюсков 12 экз./м²; превышение нормативов отмечается по ХПК, азоту нитритному, железу общему, меди, цинку и марганцу.

Станция 7 – выше п. Преображенки, выше впадения р. Выбьи, 10 км от устья р. Луги, левый берег, дно преимущественно песчано-глинистое, попадаются осколки полевого шпата; растительность – рдест *P. australis*, элодея *E. canadensis*. Плотность популяции моллюсков 9 экз./м²; превышающие нормативы среднегодовые значения концентраций отмечаются по ХПК, азоту нитритному, железу общему, меди, цинку и марганцу.

В данном исследовании местных моллюсков *U. pictorum* собирали на мелководье вручную, помещали в изотермические контейнеры с небольшим количеством природной воды из мест отбора проб. Идентификацию вида моллюсков проводили по определителю зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской части России [7].

Для подсчёта СИ отбирали моллюсков *U. pictorum* с длиной раковины от 45 до 62 мм. Возраст оценивали по полукольцам зимней приостановки роста, прибавляя ещё год, как это принято в литературных источниках [8]. Отобранные моллюски были близкого возраста – 5–6 лет.

Животных доставляли в день сбора в лабораторию и помещали в стеклянные аквариумы с природной водой из мест сбора и с небольшим количеством донных отложений, которые помещали на дно аквариума.

Через сутки для каждого из собранных моллюсков измеряли общую массу, массу раковины, массу сырых тканей моллюсков. Длину, высоту раковины и толщину моллюска измеряли штангенциркулем (в мм) индивидуально для каждого моллюска с каждой станции сбора. Общую массу моллюсков, сырых тканей и раковины определяли путём взвешивания на весах электронных лабораторных M-ER 122ACF(JR) (MERCURY WP TECH GROUP CO, LTD 648-59, Seoul, Korea), предел погрешности ± 0,25e.

Индекс состояния (здоровья) вычисляли по 3 ранее предложенным формулам [9]. В нашей работе это формулы 1, 2 и 3:

$$\begin{aligned}
 CI(1) &= (\text{сырая масса тканей} / \text{масса раковины}) \cdot 100 \\
 CI(1) &= (\text{wet meat weight} / \text{shell weight}) \cdot 100
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$CI(2) = (\text{сырая масса тканей} / \text{общая масса животного}) \cdot 100$$

$$CI(2) = (\text{wet meat weight} / \text{total animal weight}) \cdot 100 \quad (2)$$

$$CI(3) = (\text{сырая масса тканей} / \text{длина раковины}) \cdot 100$$

$$CI(3) = (\text{wet meat weight} / \text{shell length}) \cdot 100 \quad (3)$$

По данным работы [7], CI можно рассчитать как соотношение сырой массы мягких тканей к общей массе моллюска, что фактически является индексом «упитанности» (уравнение 8 по [9]). В работе [9] также предложен метод, основанный на определении массы сырых тканей. В отличие от всех перечисленных методов, в работе [10] предлагается рассчитывать соотношение массы сырых тканей и длины раковины, в нашей работе – это индекс CI(3).

Морфометрические показатели и рассчитанные по ним индексы состояния (здоровья) местных моллюсков *U. pictorum* были подвергнуты статистическому анализу. Оценки значимости различий индексов состояния моллюсков из разных участков реки проводили в программе PAST 4.14 с помощью однофакторного дисперсионного анализа с уровнем достоверности $p < 0,05$. Если дисперсии не были значимо неоднородными согласно критерию Levene, использовали классический дисперсионный анализ по Фишеру и последующее парное сравнение по критерию Тьюки. В противном случае применяли *F*-критерий Уэлча и парное сравнение по Геймсу-Хауэллу в виде функции в среде Matlab [11].

Боксплоты, отражающие данные по индексам состояния моллюсков, были построены в программе Matlab 8.2.0. Для расчёта сходимости результатов разных методов вычисления индексов здоровья моллюсков были построены линейные регрессии в программе GraphPad Prism 8.0.1.

Результаты и обсуждение

Для выбранных станций мониторинга кислородный режим в период наблюдений 15–31 августа 2023 г. удовлетворительный. Содержание растворённого кислорода в большинстве станций не опускалось ниже 7,8 мг/л, за исключением городского пляжа в г. Луге, где это значение было 5,3 мг/л. По концентрации водородных ионов (pH) воды р. Луги относятся к нейтральным и слабощелочным (7,1–8,3).

Основные физико-химические показатели качества воды р. Луги представлены в таблице 1.

Значения содержания тяжёлых металлов (ТМ) в донных отложениях разных локаций исследования на р. Луге приведены ниже (табл. 2).

Для оценки состояния (здоровья) животных применяли методы вычисления CI на основе измерения морфометрических и массовых показателей моллюсков (табл. 3).

Морфометрические и массовые показатели служили для расчёта индексов состояния (здоровья) устриц. Графическое представление рассчитанных данных по CI моллюсков из разных станций продемонстрировано на рисунке 2.

Сравнительный анализ боксплотов (рис. 2) показал, что станция 4 отличается минимальными значениями CI(1) и CI(2). Станция 6 (ниже г. Кингисеппа) выделяется высокими значениями индекса, рассчитанного по формулам 1 (масса тканей и раковины сопоставимы, т. е. раковина не толстая) и 2 (масса тканей и общая масса моллюска). Достоверные отличия по результатам дисперсионного анализа приведены на рисунке 2 в виде различных букв над выборками. Значимой неоднородности в дисперсиях, согласно критерию Levene, не наблюдалось только для индекса CI(1) ($p = 0,09$). Для двух других индексов дисперсии были значимо неоднородными ($p < 0,0022$), и для сравнения средних был использован *F*-критерий Уэлча и апостериорный парный тест по Геймсу-Хауэллу.

Сходимость результатов расчёта CI, вычисленных по различным размерно-весовым параметрам моллюсков (см. формулы 1, 2 и 3) была подвергнута линейной регрессии. Данные представлены ниже (рис. 3).

Линейную регрессию можно интерпретировать таким образом, что CI(1) линейно возрастает с CI(2), т. к. угловой коэффициент значимо отличается от нуля ($F = 183,7, p < 0,0001$). Однако индекс CI(3) не коррелирует ни с CI(1), ни с CI(2), поскольку угловой коэффициент соответствующих регрессий значимо не отличается от нуля ($F = 1,591, p = 0,215$ для CI(1) и $F = 0,374, p = 0,544$ для CI(2)).

Проведённый анализ физико-химических показателей качества воды в различных локациях р. Луги показал, что городской пляж г. Луги испытывает антропогенное воздействие: наблюдались превышения ХПК, БПК₅. Содержание растворённого O₂ в этой локации было пониженным (5,3 мг/дм³) по сравнению

Таблица 1 / Table 1

Основные физико-химические показатели качества воды р. Луги в изучаемых локациях в августе 2023 г.
Base physicochemical parameters of surface waters in study sites of the River Luga in August 2023

| Показатель Parameter | Станция / Sampling site | | | | | | |
|--|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| pH | 7,0 | 7,1 | 7,2 | 7,2 | 8,3 | 8,1 | 8,1 |
| Растворённый O ₂ , мг/дм ³ Dissolved oxygen, mg/dm ³ | 7,0 | 5,3 | 8,1 | 7,8 | 10,0 | 9,6 | 12,0 |
| T, °C | 22,7 | 23,5 | 21,0 | 21,4 | 21,9 | 23,6 | 24,0 |
| Электропроводность, мСм/см Electrical conductivity, mS/cm | 0,36 | 0,27 | 0,29 | 0,27 | 0,34 | 0,36 | 0,97 |
| Мутность, мг/дм ³ Turbidity, mg/dm ³ | 2,13 | <1,0 | 1,14 | <1,0 | 1,08 | 1,28 | 2,23 |
| Взвешенные вещества, мг/дм ³ Suspended substances, mg/dm ³ | <3,0 | <3,0 | <3,0 | <3,0 | <3,0 | 6,4 | 10,2 |
| БПК ₅ , мгO ₂ /дм ³ BOD ₅ , mgO ₂ /dm ³ | 1,77 | 3,26 | 2,3 | 1,96 | 0,94 | 3,07 | 2,21 |
| Окисляемость бихроматная, мгO/дм ³ Oxidizability bichromatic, mgO/dm ³ | 32,6 | 35,7 | 21,3 | 20,3 | 20,3 | 20,8 | 25,1 |
| N-NH ₄ , мг/дм ³ / mg/dm ³ | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| N-NO ₂ , мг/дм ³ / mg/dm ³ | 0,039 | 0,044 | 0,067 | 0,039 | 0,022 | 0,178 | 0,070 |
| N-NO ₃ , мг/дм ³ / mg/dm ³ | 1,05 | 1,28 | 1,81 | 1,60 | 6,70 | 4,10 | 3,20 |
| Азот общий, мг/дм ³ Total nitrogen, mg/dm ³ | 0,35 | 0,40 | 0,60 | 0,53 | 1,52 | 0,98 | 0,02 |
| Фосфат-ион, мг/дм ³ Phosphate ion, mg/dm ³ | 0,089 | 0,105 | 0,107 | 0,103 | <0,05 | 0,15 | 0,56 |
| Фосфор общий, мг/дм ³ Total phosphorus, mg/dm ³ | <0,04 | 0,042 | 0,041 | 0,041 | <0,04 | 0,051 | 0,19 |

Примечание к таблицам 1–3 и рисунку 3: описание станций см. в тексте.
Note to Tables 1–3 and Figure 3: for sampling sites, see text.

Таблица 2 / Table 2

Содержание ТМ в донных отложениях (мкг/г, сух. масса) и коэффициент бионакопления (BSAF) в мягких тканях моллюсков из локаций р. Луги / Heavy metal content in bottom sediments (µg/g, dry weight) and bioaccumulation coefficient (BSAF) in mollusk soft tissues in the Luga River

| Металл Metal | Станция / Sampling site | | | | | | |
|---|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Концентрация ТМ в донных отложениях / Heavy metal content in bottom sediments | | | | | | | |
| Pb | 7,9±1,1 | 8,6±1,3 | 4,2±0,5 | 4,8±0,7 | 6,4±1,2 | 6,9±1,1 | 9,8±1,8 |
| Zn | 31,3±3,7 | 10,5±1,7 | 12,3±2,2 | 9,1±1,2 | 17,5±2,8 | 13,0±1,9 | 11,8±1,9 |
| Cd | 0,061 ±0,013 | 0,072 ±0,017 | 0,034 ±0,010 | 0,157 ±0,031 | 0,073 ±0,020 | 0,076 ±0,018 | 0,069 ±0,017 |
| Cu | 3,8±0,5 | 4,6±0,6 | 1,64±0,18 | 2,33±0,32 | 2,09±0,25 | 2,08±0,29 | 2,59±0,38 |
| BSAF | | | | | | | |
| Pb | 0,13 | 0,13 | 0,24 | 0,21 | 0,15 | 0,25 | 0,1 |
| Zn | 8,3 | 7,5 | 16,6 | 15,3 | 11,8 | 6,5 | 8,2 |
| Cd | 3,8 | 0,7 | 3,8 | 1,9 | 3,0 | 0,8 | 2,0 |
| Cu | 1,9 | 1,4 | 4,0 | 3,6 | 2,9 | 3,6 | 2,2 |

Таблица 3 / Table 3

Сравнительная характеристика морфометрических и массовых показателей моллюсков *Unio pictorum* из разных локаций р. Луги, среднее±стандартное отклонение (n=10)
Comparative morphometric and weight characteristics of the *Unio pictorum* from different sampling sites in the Luga River, Mean±SD (n=10)

| Станция / Sampling site | Длина раковины, мм / Shell length, mm | Высота раковины, мм / Shell height, mm | Ширина раковины, мм / Shell width, mm | Общая масса моллюска, г / Mollusk total weight, g |
|-------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|---|
| 1 | 62,0±2,0 | 30,9±1,7 | 22,4±1,1 | 19,4±1,4 |
| 2 | 46,0±4,0 | 24,6±2,1 | 17,2±0,7 | 9,4±2,7 |
| 3 | 53,2±6,9 | 27,0±3,4 | 19,0±2,3 | 13,2 ±4,5 |
| 4 | 60,3±6,3 | 28,8±2,8 | 20,8±1,7 | 18,6±6,4 |
| 5 | 57,8±4,2 | 29,4±1,9 | 19,0±2,8 | 14,3±4,2 |
| 6 | 51,5±3,6 | 29,5±1,6 | 16,3±1,5 | 9,6±1,8 |
| 7 | 52±5,1 | 27,5±3,7 | 18,7±1,4 | 11,4±2,4 |

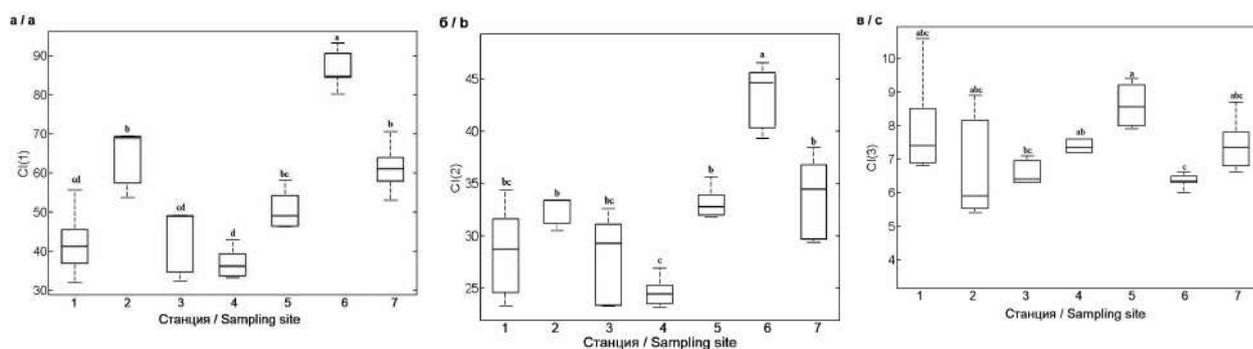


Рис. 2. Обобщённые данные расчёта CI моллюсков для станций наблюдения: а – по формуле 1, б – по формуле 2, в – по формуле 3. Красная линия внутри бокса – медианное значение в каждой выборке по станциям, горизонтальные синие линии – 25 и 75 процентиля, штриховые линии – минимум и максимум, охватывающие имеющиеся в выборке значения. Буквы над боксами обозначают значимые различия между средними выборок согласно результатам дисперсионного анализа: $d < c < b < a$

Fig. 2. Generalized data for calculating the CI of mollusks for sampling sites: a – by formula 1, b – by formula 2, c – by formula 3. The red line inside the box is the median value in each sample, the horizontal blue lines are 25th and 75th percentiles, and the dashed lines are the minimum and maximum, covering the values available in the sample. Letters indicate significant differences between sample means according to the results of variance analysis: $d < c < b < a$

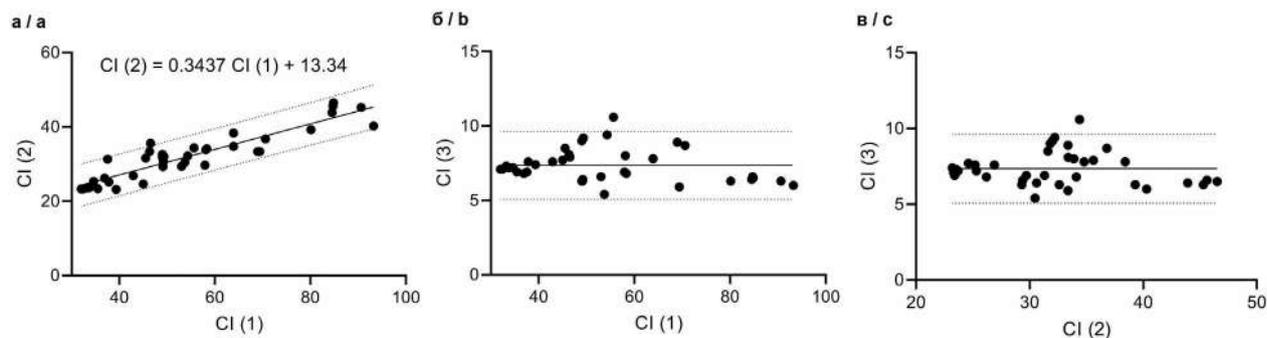


Рис. 3. Графики линейной регрессии при сравнении результатов вычисления CI: а – по формулам 1 и 2, б – по формулам 1 и 3, в – по формулам 2 и 3

Fig. 3. Linear regression graphs when comparing CI calculation results using: a – formulas 1 and 2, b – formulas 1 and 3, c – formulas 2 and 3

с другими локациями. Этот фактор также оказывает значительное влияние на состояние популяции моллюсков.

Независимо от локации, последовательность убывания содержания металлов в донных отложениях была следующей: Zn>Pb>Cu>Cd.

Анализ содержания ТМ в донных отложениях и тканях моллюсков показал наличие повышенного по сравнению с другими локациями содержания Рb на станциях 2 и 7. Для Cd максимальные значения отмечены на станции 4 (ниже п.г.т. Толмачево).

Для станции 2 (пляж г. Луги) содержание Cu относительно велико, однако, известно, что Cu входит в состав гемолимфы, и её высокое содержание до определённых пределов не изменяет статус здоровья моллюсков. Zn, в свою очередь, участвует в образовании коферментов, что имеет большое значение для нормального функционирования организма [12, 13]. Таким образом, выявленные концентрации этих металлов не могут существенно влиять на здоровье местных моллюсков.

Результаты проведённых исследований на особях вида *U. pectorum*, в возрасте 5+ лет, на разных участках реки позволили выявить, что морфометрические характеристики моллюсков в разных участках реки неоднородны. Этим обусловлены и различия в индексах состояния (здоровья) моллюсков. Вычисленные индексы СИ для моллюсков из разных локаций на р. Луге являются довольно высокими, что свидетельствует об удовлетворительном функциональном состоянии моллюсков в изученных локациях.

Индекс СИ(2) представляется нам, как и ряду других исследователей [9, 14], наиболее объективным, поскольку указывает на упитанность моллюсков. Максимальных значений (46,5) он достигал на станции 6, ниже впадения р. Солки. Возможно, это связано с большим количеством детрита (основная пища этих двустворок), наблюдаемого у дна в этой локации. Таким образом, естественный аллохтонный растительный материал (перегнивающие листья деревьев) может являться дополнительной пищей для моллюсков. Отметим, что на этой станции наблюдали и максимальную численность моллюсков – 10–12 экз./м². На станции 2 (пляж г. Луга) отмечается незначительное число особей в популяции, что может быть связано, кроме загрязнения среды, с низким значением растворённого O₂ в воде.

Минимальные значения индексов по формулам 1 и 2 были получены для станции 4.

На поверхности раковин унионид из этой локации были обнаружены отдельные моллюски *Dreissena polymorpha*, что может указывать на ослабленность местных моллюсков.

Вероятно, загрязнение до определённой степени не сказывается на росте моллюска, а отсутствие некоторых естественных особенностей биотопа (например, благоприятного субстрата для закапывания (песок и песчаноглинистые грунты), скорость течения реки в изучаемом створе, наличие пищи и др.) в большей мере оказывает воздействие на стабильное существование популяции и физиологический статус моллюсков сем. Unionidae в случае умеренного загрязнения среды их обитания. На этот факт указывается и в работе [15], выполненной на брюхоногих моллюсках Нижней Волги.

Максимальные значения индекса СИ(3), часто применяемого зарубежными физиологами-экологами в качестве индикативного показателя при оценке состояния природных вод с использованием двустворчатых моллюсков (например, [10]), были получены для станции 5 (выше г. Кингисеппа, выше впадения р. Славянки в р. Лугу).

Данные регрессионного анализа (рис. 3) указывают на хорошую сходимость результатов оценки СИ по паре формул 1 и 2.

Заключение

Комплексное изучение экологического состояния разных локаций на р. Луге позволило выявить различия между локациями в качестве поверхностных вод, содержании ТМ в донных отложениях и в бионакоплении ТМ моллюсками.

Сравнительный анализ индексов состояния (здоровья) моллюсков, вычисленный с использованием различных морфометрических и весовых показателей, показал эффективность применения такого подхода в оценке экологического состояния изучаемых водных экосистем.

Данное исследование выполнено в рамках государственного задания НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме «Разработка методов мониторинга здоровья экосистем Северо-Запада России» (FFZF-2025-0018) и государственного задания ФИЦ ИнБЮМ РАН по теме «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» (Рег. номер 124022400152-1).

Литература

1. Манвелова А.Б., Киселев А.В., Неробелов Г.М., Седеева М.С., Махура А.Г., Петухов В.В., Дроздова И.В., Горный В.И. Многолетние изменения дистанционно измеренных характеристик экосистем бассейна реки Луги как реакция на техногенное воздействие // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 40–56. doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-40-56

2. Ежегодник качества поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям на территории деятельности ФГБУ «Северо-Западное УГМС» (Санкт-Петербург, Ленинградская, Новгородская, Псковская области и республика Карелия) 2023 год. СПб.: ФГБУ «Северо-Западное УГМС», 2024. 205 с.

3. Кузнецова Т.В., Манвелова А.Б., Поляк Ю.М. Комплексная оценка экологического состояния участка трансграничной реки Нарвы // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 1. С. 64–72. doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-064-072

4. Кузнецова Т.В., Холодкевич С.В., Манвелова А.Б., Фруммин 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

5. Рижинашвили А.Л. Количественные характеристики абсолютного роста перловиц (*Bivalvia*, *Unionidae*) в различных водоёмах европейской части России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3. Биология. 2008. № 2. С. 3–14.

6. Zeng Y., Yang H. Review of molluscan bivalve condition index calculations and application in Northern Quahogs *Mercenaria mercenaria* // Aquac. Res. 2021. V. 52. P. 23–36. doi: 10.1111/are.14866

7. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 2. Зообентос / под ред. В.Р. Алексеева, С.Я. Цалолыхина. М.–СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 457 с.

8. Старобогатов Я.И. Раки, моллюски. Л.: Лениздат, 1988. 138 с.

9. Gvozdrenović S., Mandić M., Peraš I. Morphometry and condition index in Mediterranean mussels (*Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819) from Boka Kotorska Bay (Montenegro, Southeast Adriatic Sea) // Studia Marina. 2020. V. 33. No. 2. P. 15–26. doi: 10.5281/zenodo.4314146

10. Dabrowska H., Kopko O., Turja R., Lehtonen K.K., Góra A., Polak-Juszczak L., Warzocha J., Kholodkevich S. Sediment contaminants and contaminant levels and biomarkers in caged mussels (*Mytilus trossulus*) in the southern Baltic Sea // Mar. Environ. Res. 2013. V. 84. P. 1–9. doi: 10.1016/j.marenvres.2012.11.001

11. MathWorks [Электронный ресурс] http://mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50452-pierremegvand-games_howell (Дата обращения: 15.07.2024).

12. 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. Pollut. 2016. V. 210. P. 155–165. doi: 10.1016/j.envpol.2015.12.014

13. Moiseenko T.I. Bioavailability and ecotoxicity of metals in aquatic systems: critical contamination levels // Geochem. Int. 2019. V. 57. P. 737–750. doi: 10.1134/S0016702919070085

14. Davenport J., Chen X. A comparison of methods for the assessment of condition in the mussel (*Mytilus edulis* L.) // J. Moll. Stud. 1987. V. 53. No. 3. P. 293–297. doi: 10.1093/mollus/53.3.293

15. Михайлов Р.А. Особенности пространственного распределения *Viviparus (Viviparus) Viviparus* (Mollusca, Gastropoda, Viviparidae) равнинной реки Нижней Волги // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2020. Т. 5. № 3. doi: 10.21685/2500-0578-2020-3-1

References

1. Manvelova A.B., Kiselev A.V., Nerobelov G.M., Sedeeva M.S., Makhura A.G., Petukhov V.V., Drozdova I.V., Gornyy V.I. Long-term changes in remotely measured characteristics of ecosystems of the Luga River basin as a reaction to technogenic impact // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19. No. 4. P. 40–56 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-40-56

2. 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), 2023. Sankt-Peterburg: FGBU “Severo-Zapadnoe UGMS”, 2024. 205 p. (in Russian).

3. Kuznetsova T.V., Manvelova A.B., Polyak Y.M. Comprehensive assessment of the ecological state of the transboundary Narva River // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 1. P. 64–72 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-064-072

4. 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

5. Rzhinashvili A.L. Quantitative parameters of *Unionidae*-like mussels (*Bivalvia*, *Unionidae*) absolute growth from some waterbodies of the European part of Russia // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 3. Biologiya. 2008. No. 2. P. 3–14 (in Russian).

6. Zeng Y., Yang H. Review of molluscan bivalve condition index calculations and application in Northern Quahogs *Mercenaria mercenaria* // Aquac. Res. 2021. V. 52. P. 23–36. doi: 10.1111/are.14866

7. Identifier of zooplankton and zoobenthos species of European Russia fresh waters. V. 2. Zoobenthos / Eds. V.R. Alekseev, S. Ya. Tsalolikhin. Moskva–Sankt-Peterburg: Tovarišchestvo nauchnyh izdanij KMK, 2016. 457 p. (in Russian).

8. Starobogator Ya.I. Crayfish, mollusks. Leningrad: Lenizdat, 1988. 138 p. (in Russian).

9. Gvozdrenović S., Mandić M., Peraš I. Morphometry and condition index in Mediterranean mussels (*Mytilus galloprovincialis* Lamarek, 1819) from Boka Kotorska Bay (Montenegro, Southeast Adriatic Sea) // *Studia Marina*. 2020. V. 33. No. 2. P. 15–26. doi: 10.5281/zenodo.4314146

10. Dabrowska H., Kopko O., Turja R., Lehtonen K.K., Góra A., Polak-Juszczak L., Warzocha J., Kholodkevich S. Sediment contaminants and contaminant levels and biomarkers in caged mussels (*Mytilus trossulus*) in the southern Baltic Sea // *Mar. Environ. Res.* 2013. V. 84. P. 1–9. doi: 10.1016/j.marenvres.2012.11.001

11. MathWorks [Internet resource] http://mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50452-pierremegevand-games_howell (Accessed: 15.07.2024).

12. 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. Pollut.* 2016. V. 210. P. 155–165. doi: 10.1016/j.envpol.2015.12.014

13. Moiseenko T.I. Bioavailability and ecotoxicity of metals in aquatic systems: critical contamination levels // *Geochem. Int.* 2019. V. 57. P. 737–750. doi: 10.31857/S0016-7525647675-688

14. Davenport J., Chen X. A comparison of methods for the assessment of condition in the mussel (*Mytilus edulis* L.) // *J. Moll. Stud.* 1987. V. 53. No. 3. P. 293–297. doi: 10.1093/mollus/53.3.293

15. Mikhailov R.A. Spatial distribution features of *Viviparus (Viviparus) Viviparus* (Mollusca, Gastropoda, Viviparidae) in the plain river of the Lower Volga // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2020. V. 5. No. 3 (in Russian). doi: 10.21685/2500-0578-2020-3-1