ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 594.3:591.436:661.72
https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-344-352

Поступила в редакцию 22.04.2026
Received 22.04.2026

М. В. Вишневская, П. Ю. Пинчук, А. А. Чиркин

Витебский государственный университет имени П. М. Машерова, Витебск, Республика Беларусь

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕПАТОПАНКРЕАСА ПРЕСНОВОДНЫХ МОЛЛЮСКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АЛИФАТИЧЕСКИХ СПИРТОВ С РАЗНОЙ ДЛИНОЙ УГЛЕРОДНОЙ ЦЕПИ

Аннотация. Алифатические спирты относятся к факторам антропогенного загрязнения водных экосистем. Структурные изменения гепатопанкреаса лёгочных пресноводных моллюсков под их воздействием остаются недостаточно изученными. В работе проведена сравнительная оценка морфологических изменений гепатопанкреаса у катушки роговой (*Planorbarius corneus* L.) и прудовика обыкновенного (*Lymnaea stagnalis* L.) при остром воздействии алифатических спиртов с различной длиной углеродной цепи (C_1–C_6).

Эксперимент включал экспозицию в течение 1 ч к растворам метанола, этанола, изопропанола, бутанола-1 и гексанола-1 с последующим 48-часовым периодом восстановления. Установлено, что степень морфологических изменений гепатопанкреаса зависела от концентрации и вида спирта. Наиболее выраженные изменения отмечены при воздействии изопропанола, бутанола-1 и гексанола-1. Катушка роговая более устойчива к воздействию спиртов и активнее выделяет слизь, тогда как у прудовика обыкновенного этанол стимулирует репродуктивную активность.

Полученные результаты подтверждают высокую чувствительность гепатопанкреаса пресноводных моллюсков к алифатическим спиртам. Это обосновывает использование морфологических изменений гепатопанкреаса в качестве биомаркера экотоксикологического мониторинга водных экосистем.

Ключевые слова: экотоксикологический мониторинг, метанол, этанол, изопропанол, бутанол-1, гексанол-1, *Lymnaea stagnalis* L., *Planorbarius corneus* L., гистологические повреждения, биомаркеры

Для цитирования: Вишневская, М. В. Морфологические изменения гепатопанкреаса пресноводных моллюсков при воздействии алифатических спиртов с разной длиной углеродной цепи / М. В. Вишневская, П. Ю. Пинчук, А. А. Чиркин // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2026. – Т. 71, № 4. – С. 344–352. https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-344-352

Maria V. Vishnevskaya, Polina Yu. Pinchuk, Alexander A. Chirkin

Vitebsk State University named after P. M. Masherov, Vitebsk, Republic of Belarus

MORPHOLOGICAL CHANGES IN THE HEPATOPANCREAS OF FRESHWATER MOLLUSKS EXPOSED TO ALIPHATIC ALCOHOLS WITH DIFFERENT CARBON CHAIN LENGTHS

Abstract. Aliphatic alcohols are among the factors of anthropogenic pollution of aquatic ecosystems. Structural changes in the hepatopancreas of pulmonate freshwater mollusks under their exposure remain insufficiently studied. In this work, a comparative assessment of morphological changes in the hepatopancreas of the ramshorn snail (*Planorbarius corneus* L.) and the great pond snail (*Lymnaea stagnalis* L.) was performed following acute exposure to aliphatic alcohols with different carbon chain lengths (C_1–C_6).

The experiment involved a one-hour exposure to solutions of methanol, ethanol, isopropanol, butanol-1, and hexanol-1, followed by a 48-hour recovery period. The degree of morphological changes in the hepatopancreas was found to depend on the concentration and type of alcohol. The most pronounced changes were observed following exposure to isopropanol, butanol-1, and hexanol-1. The ramshorn snail was more resistant to alcohol exposure and secreted more mucus, whereas in the great pond snail ethanol stimulated reproductive activity.

The obtained results confirm the high sensitivity of the hepatopancreas of freshwater mollusks to aliphatic alcohols. This justifies the use of morphological changes in the hepatopancreas as a biomarker for the ecotoxicological monitoring of aquatic ecosystems.

Keywords: ecotoxicological monitoring, methanol, ethanol, isopropanol, butanol-1, hexanol-1, *Planorbarius corneus* L., *Lymnaea stagnalis* L., histological damage, biomarkers

For citation: Vishnevskaya M. V., Pinchuk P. Yu., Chirkin A. A. Morphological changes in the hepatopancreas of freshwater mollusks exposed to aliphatic alcohols with different carbon chain lengths. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2026, vol. 71, no. 4, pp. 344–352 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-344-352

© Вишневская М. В., Пинчук П. Ю., Чиркин А. А., 2026

Введение. В Республике Беларусь легочные пресноводные моллюски давно выполняют роль модельных организмов. На них изучают организацию нервных центров [1, 2], исследуют процессы радиоадаптации в загрязненных водоемах [3]. Антиоксидантные системы этих животных – маркеры при воздействии стрессовых факторов [4]. Используя моллюсков, оценивают влияние тяжелых металлов на жизнеспособность гидробионтов [5]. Наряду с этим проводят биоэкологическую оценку состояния поверхностных вод и моделируют нарушения обмена аминокислот и глюкозы [6]. Особенно часто используют два вида – катушку роговую (*Planorbarius corneus* L.) и прудовика обыкновенного (*Lymnaea stagnalis* L.). Они удобны для лабораторного содержания и дают воспроизводимые результаты.

Гепатопанкреас лёгочных пресноводных моллюсков участвует в переваривании пищи, детоксикации ксенобиотиков, а также в транспорте веществ гемолимфой. Кроме того, он играет важную роль в регуляции обмена веществ, в том числе под воздействием пептидов [7]. Такой спектр функциональной активности гепатопанкреаса делает его важным органом-мишенью для экотоксикологических исследований [8].

В последние десятилетия антропогенная нагрузка на водные экосистемы существенно возросла вследствие поступления органических растворителей, в том числе алифатических спиртов [9]. Основные источники их появления в водоемах – сточные воды химических, фармацевтических и целлюлозно-бумажных производств. Метанол и этанол поступают также со стоками спиртовых заводов и очистных сооружений. Изопропанол, бутанол и гексанол часто обнаруживаются в сточных водах предприятий по производству пластмасс, синтетических смол и лакокрасочных материалов [10].

Воздействие алифатических спиртов вызывает у гидробионтов развитие окислительного стресса и нарушения энергетического обмена, что сопровождается повреждением клеточных структур и активацией процессов клеточной гибели [11]. На тканевом уровне наиболее выраженные изменения наблюдаются в органах, участвующих в метаболизме и накоплении ксенобиотиков, в частности в гепатопанкреасе [12]. Увеличение длины углеродной цепи алифатических спиртов, как правило, сопровождается повышением их липофильности. Это может влиять на взаимодействие соединений с биологическими мембранами и выраженность их токсического действия. Для ряда алифатических спиртов показана связь между длиной углеродной цепи и токсическим эффектом [13]. В отличие от млекопитающих, для гидробионтов зависимость токсичности спиртов от длины цепи мало изучена. В единичных работах приведены данные о влиянии этанола на репродуктивные показатели пресноводных моллюсков, однако они не включают гистологический анализ тканей [14]. Токсические эффекты метанола подробно изучены на рыбах и некоторых беспозвоночных животных, где описаны нарушения роста, питания и структуры тканей [15]. Для моллюсков эти данные остаются недостаточно изученными.

Токсическое воздействие алифатических спиртов на гидробионтов связано не только с их мембранотропными эффектами, но и с образованием активных форм кислорода в процессе метаболизма. Окисление спиртов алкогольдегидрогеназой и альдегиддегидрогеназой приводит к накоплению токсичных альдегидов и генерации супероксидного радикала, что запускает перекисное окисление липидов и повреждение белков [16, 17]. У моллюсков, как и у других гидробионтов, степень окислительного стресса связана с выраженностью тканевых повреждений, однако для гепатопанкреаса легочных моллюсков такие данные практически отсутствуют. Учитывая то, что гепатопанкреас является центральным органом биотрансформации ксенобиотиков, его структурная целостность критична для поддержания детоксикационной функции организма. Следовательно, оценка морфологических изменений этого органа при остром воздействии спиртов может дать прямую информацию о степени токсического поражения и возможностях восстановления.

Цель исследования – сравнить морфологические изменения гепатопанкреаса и поведенческих реакций пресноводных моллюсков катушки роговой (*P. corneus* L.) и прудовика обыкновенного (*L. stagnalis* L.) при воздействии алифатических спиртов с различной длиной углеродной цепи (C_1–C_6).

Материалы и методы исследования. Объектами исследования послужили половозрелые особи двух видов легочных пресноводных моллюсков – катушки роговой (*P. corneus* L.) и прудовика обыкновенного (*L. stagnalis* L.). Всего было использовано 220 особей (110 каждого вида). Для

каждого вида моллюски были случайным образом распределены на 11 групп (n = 10 в группе): 1 контрольная и 10 экспериментальных.

Контрольные группы содержались в отстоянной водопроводной воде. Для экспериментальных групп готовили водные растворы алифатических спиртов: этанол – 1 и 5 %, изопропанол – 0,5 и 2 %, а для метанола, бутанола-1 и гексанола-1 – 0,25 и 1 %. Концентрации подбирали так, чтобы уровни сублетального воздействия были сходными, что позволило обоснованно сравнивать морфологические изменения гепатопанкреаса.

Экспозицию моллюсков проводили в пластиковых контейнерах при температуре 20 ± 1 °C в течение 1 ч. Затем моллюсков переносили в отстоянную воду без спиртов на 48 ч (период восстановления). После чего животных усыпляли и извлекали гепатопанкреас для гистологического анализа.

Образцы гепатопанкреаса фиксировали в 10%-м нейтральном формалине в течение 7 сут. После фиксации ткани промывали в проточной воде, обезвоживали в возрастающих концентрациях этанола (70, 80, 96 %), просветляли в ксилоле и заливали в парафин по стандартной методике. Срезы толщиной 5–7 мкм получали на ротационном микротоме и окрашивали гематоксилином и эозином. Микроскопическое исследование проводили с использованием светового микроскопа Levenhuk MED 45T при увеличении ×100.

Гистологические изменения гепатопанкреаса оценивали полуколичественно по 4-балльной шкале: 1 – отсутствие изменений, 2 – слабые изменения (менее 25 % ацинусов), 3 – умеренные изменения (25–50 % ацинусов), 4 – выраженные изменения (более 50 % ацинусов). Оценку проводили без учета принадлежности образцов к экспериментальным группам.

Оценку поведенческих реакций моллюсков проводили через 2 ч после переноса в отстоянную воду без спиртов. Наблюдение за каждой особью осуществляли в течение 10 мин. Оценивали двигательную активность, реакцию на механическое раздражение, слизеобразование и репродуктивную активность. Реакцию на механическое раздражение вызывали стандартным тактильным стимулом (стеклянная палочка). Слизеобразование учитывали визуально по интенсивности слизистого следа и наличию выделений. Репродуктивную активность определяли по наличию кладок в течение 48 ч восстановления. Поведенческие реакции оценивали полуколичественно по 4-балльной шкале: «–» – отсутствие проявлений, «+» – слабая выраженность, «++» – умеренная выраженность, «+++» – высокая выраженность.

Для каждой особи рассчитывали интегральный показатель повреждения как среднее арифметическое четырех морфологических признаков: расширение просветов ацинусов, накопление клеточного детрита, дезорганизация эпителия и вакуолизация цитоплазмы. Статистический анализ проводили с использованием непараметрических методов, поскольку распределение данных отличалось от нормального. Для оценки различий между группами применяли критерий Краскела – Уоллиса (Kruskal-Wallis H-test) с последующим post hoc анализом по критерию Данна (Dunn's multiple comparisons test) для множественных попарных сравнений. Различия считали статистически значимыми при $p < 0{,}05$. Статистическую обработку данных осуществляли с использованием программного пакета GraphPad Prism 5.0.

Результаты и их обсуждение. В ходе исследования установлено, что воздействие алифатических спиртов вызывает статистически значимые различия степени повреждения гепатопанкреаса у катушки роговой и прудовика обыкновенного (Kruskal-Wallis H-test, $p < 0{,}0001$). Выраженность изменений зависит от длины углеродной цепи и концентрации спирта (табл. 1).

При воздействии метанола и этанола структурные нарушения были относительно слабыми. Изопропанол, бутанол-1 и гексанол-1 вызывали более выраженные изменения, включая дезорганизацию ацинарной архитектуры. Более сильное повреждающее действие этих спиртов может быть связано с их большей липофильностью. В гомологическом ряду алифатических спиртов увеличение длины углеродной цепи сопровождается ростом коэффициента распределения октанол–вода от –0,77 для метанола до 2,03 для гексанола-1. Повышение гидрофобности способствует взаимодействию спиртов с липидными компонентами биомембран и может приводить к нарушению их структурной целостности, что соответствует литературным данным [18, 19].

Таблица 1. **Степень повреждения гепатопанкреаса катушки роговой и прудовика обыкновенного при воздействии алифатических спиртов**

Table 1. **Degree of damage to the hepatopancreas of the ramshorn snail and the great pond snail when exposed to aliphatic alcohols**

Спирт, концентрация	Катушка роговая	Прудовик обыкновенный
Контроль	1,0 ± 0,00	1,0 ± 0,00
Метанол 0,25 %	1,5 ± 0,17	1,4 ± 0,16
Метанол 1 %	1,8 ± 0,13	1,7 ± 0,15
Этанол 1 %	2,5 ± 0,18	1,6 ± 0,16
Этанол 5 %	2,8 ± 0,13*	2,2 ± 0,13*
Изопропанол 0,5 %	3,3 ± 0,15**	3,3 ± 0,15**
Изопропанол 2 %	3,6 ± 0,16***	3,5 ± 0,17***
Бутанол-1 0,25 %	3,7 ± 0,15***	3,7 ± 0,15***
Бутанол-1 1 %	3,9 ± 0,10***	3,7 ± 0,15***
Гексанол-1 0,25 %	3,7 ± 0,13***	3,8 ± 0,13***
Гексанол-1 1 %	3,9 ± 0,10***	3,9 ± 0,10***

Примечание. Данные представлены как среднее значение ± стандартная ошибка среднего (M ± SEM), $n = 10$. Статистическую значимость оценивали при сравнении с контрольной группой. * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$; отсутствие звездочек – незначимо ($p \geq 0,05$).

На рис. 1 приведены микрофотографии гепатопанкреаса катушки роговой (*P. corneus* L.) контрольной и экспериментальных групп, на рис. 2 – прудовика обыкновенного (*L. stagnalis* L.) контрольной и экспериментальных групп.

Для контрольных групп характерно отсутствие морфологических изменений, что соответствует нормальному гистологическому строению гепатопанкреаса. Воздействие низших спиртов (метанол, этанол) вызывает слабовыраженные изменения структуры органа, тогда как при воздействии более липофильных спиртов (изопропанол, бутанол-1, гексанол-1) отмечается значительное увеличение степени морфологических нарушений у обоих видов.

При воздействии метанола и этанола наблюдаются слабовыраженные изменения, проявляющиеся незначительным расширением просветов ацинусов и появлением единичточных вакуолей в цитоплазме эпителиальных клеток. Общая архитектоника гепатопанкреаса при этом сохраняется. Межклеточные границы остаются различимыми (рис. 1, *b–d*; рис. 2, *b–d*).

Повышение концентрации этанола до 5 % сопровождается усилением структурных нарушений, которые проявляются более выраженной деформацией ацинусов и расширением их просветов. В отдельных участках отмечается разрыхление эпителиального слоя и появление клеточного детрита в просветах ацинусов (рис. 1, *e*; рис. 2, *e*).

Воздействие изопропанола приводит к более выраженным изменениям по сравнению с этанолом. При концентрации 0,5 % наблюдаются деформация ацинусов, а также расширение их просветов и умеренная вакуолизация эпителиальных клеток (рис. 1, *f*; рис. 2, *f*). При концентрации 2 % изменения приобретают выраженный характер и включают дезорганизацию ацинарной структуры, истончение эпителиального слоя и увеличение количества клеточного детрита (рис. 1, *g*; рис. 2, *g*).

Наиболее значительные морфологические изменения наблюдаются при воздействии бутанола-1 и гексанола-1. При концентрации 0,25 % прослеживается явная деформация ацинусов и неоднородность эпителиального слоя (рис. 1, *h*, *j*; рис. 2, *h*, *j*). При увеличении концентрации до 1 % развивается глубокая дезорганизация структуры гепатопанкреаса: фрагментация эпителия, значительное накопление клеточного детрита, вплоть до частичной утраты четкой ацинарной организации (рис. 1, *i*, *k*; рис. 2, *i*, *k*).

Алифатические спирты приводят к морфологическим изменениям гепатопанкреаса моллюсков, степень которых возрастает с ростом концентрации и липофильности спиртов. Основные изменения – это вакуолизация эпителиальных клеток, расширение просветов ацинусов и нарушение их структурной организации. Нарушение целостности эпителиального слоя и ацинарной организации, вероятно, приводит к снижению функциональной активности гепатопанкреаса, что должно отражаться на общем физиологическом состоянии организма.

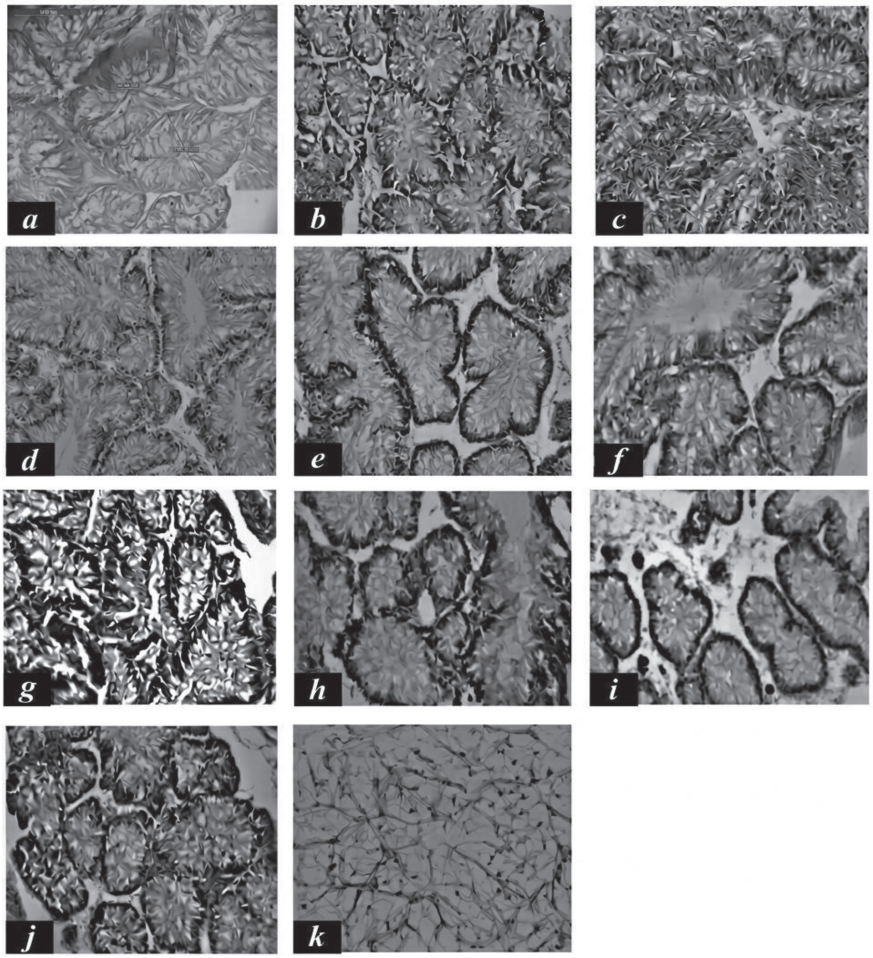


Рис. 1. Микрофотографии гепатопанкреаса *P. corneus* L.: *a* – контроль, *b* – метанол 0,25 %, *c* – метанол 1 %, *d* – этанол 1 %, *e* – этанол 5 %, *f* – изопропанол 0,5 %, *g* – изопропанол 2 %, *h* – бутанол-1 0,25 %, *i* – бутанол-1 1 %, *j* – гексанол-1 0,25 %, *k* – гексанол-1 1 %

Fig. 1. Microphotographs of the hepatopancreas of *P. corneus* L.: *a* – control, *b* – methanol 0.25 %, *c* – methanol 1 %, *d* – ethanol 1 %, *e* – ethanol 5 %, *f* – isopropanol 0.5 %, *g* – isopropanol 2 %, *h* – butanol-1 0.25 %, *i* – butanol-1 1 %, *j* – hexanol-1 0.25 %, *k* – hexanol-1 1 %

Результаты оценки поведенческих реакций представлены в табл. 2. Оценку проводили по полуколичественной шкале: «–» – отсутствие проявлений, «+» – слабая выраженность, «++» – умеренная выраженность, «+++» – высокая выраженность.

Выраженность изменений в поведении не полностью совпадает с уровнем морфологических повреждений. Возможно, включаются компенсаторные механизмы. На ранних этапах воздействия организм еще способен частично поддерживать функциональную активность, даже если структуры нарушены. Однако при усилении токсического действия этих механизмов уже не хватает.

В контрольной группе оба вида моллюсков демонстрируют выраженную ответную реакцию на механическое раздражение. После воздействия алифатических спиртов наблюдалось снижение реакции на раздражение. У прудовика обыкновенного уровень ответной реакции падал до умеренного или слабого. У катушки роговой при воздействии этанола в концентрации 1 %, изопропанола – 0,5 и 2 % и гексанола-1 – 0,25 % реакция на раздражение полностью отсутствовала. Снижение чувствительности, вероятно, связано с токсическим подавлением нервной системы.

У катушки роговой двигательная активность резко снижается под воздействием метанола в концентрациях 0,25 и 1 %, этанола – 5 %, бутанола-1 – 1 % и гексанола-1 – 1 %. Для прудовика обыкновенного снижение двигательной активности наблюдается почти во всех экспериментальных группах. Выделение слизи увеличивается при воздействии изопропанола, бутанола и гекса-

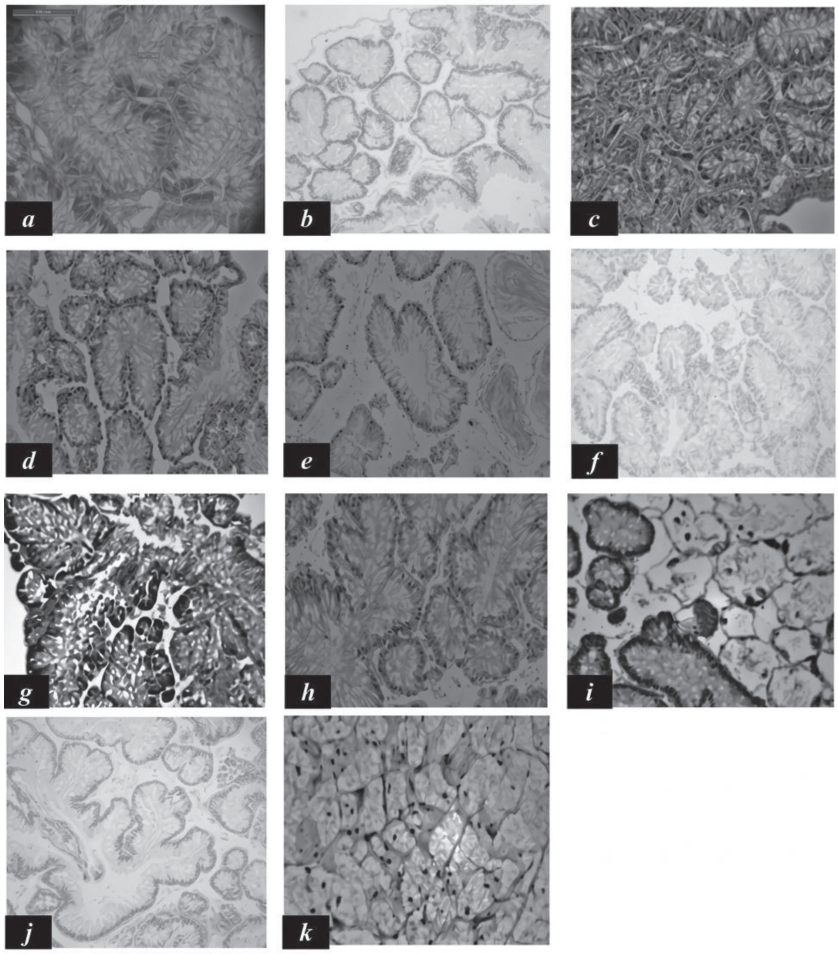


Рис. 2. Микрофотографии гепатопанкреаса *L. stagnalis* L.: *a* – контроль, *b* – метанол 0,25 %, *c* – метанол 1 %, *d* – этанол 1 %, *e* – этанол 5 %, *f* – изопропанол 0,5 %, *g* – изопропанол 2 %, *h* – бутанол-1 0,25 %, *i* – бутанол-1 1 %, *j* – гексанол-1 0,25 %, *k* – гексанол-1 1 %

Fig. 2. Microphotographs of the hepatopancreas of *L. stagnalis* L.: *a* – control, *b* – methanol 0.25 %, *c* – methanol 1 %, *d* – ethanol 1 %, *e* – ethanol 5 %, *f* – isopropanol 0.5 %, *g* – isopropanol 2 %, *h* – butanol-1 0.25 %, *i* – butanol-1 1 %, *j* – hexanol-1 0.25 %, *k* – hexanol-1 1 %

нола-1, вероятно, это проявление защитной реакции, усиливающейся с ростом длины углеродной цепи спирта.

Что касается репродуктивной активности, можно отметить, что у катушки роговой воздействие этанола в концентрациях 1 и 5 % приводит к откладыванию яиц (в контрольной группе кладок не было). У прудовика обыкновенного появление кладок наблюдается от воздействия метанола в концентрации 0,25 % и этанола – 1 и 5 %.

У прудовика обыкновенного поведенческие реакции угнетались сильнее, а двигательная активность сохранялась только при некоторых концентрациях спиртов. Это свидетельствует о меньшей устойчивости данного вида к воздействию алифатических спиртов и позволяет рассматривать прудовика обыкновенного как более чувствительный тест-объект в экотоксикологических исследованиях.

Сравнение с литературными данными показывает, что поведенческие реакции пресноводных моллюсков на алифатические спирты ранее систематически не изучались. Для других гидробионтов, например рыб, описано угнетение двигательной активности при высоких концентрациях метанола [20]. Стимуляция репродуктивной активности под воздействием этанола, выявленная в нашей работе, хорошо согласуется с данными E. C. Oliveira-Filho et al. [15]. В их исследовании наблюдается увеличение числа кладок *Biomphalaria tenagophila*, но в отличие от нашего исследования, в их работе такой эффект был достигнут при хроническом воздействии

Таблица 2. **Поведенческие реакции пресноводных моллюсков при воздействии алифатических спиртов**

Table 2. **Behavioral responses of freshwater mollusks to aliphatic alcohols**

Спирт, концентрация	Двигательная активность	Реакция на механическое раздражение	Слизеобразование	Репродуктивная активность
Катушка роговая				
Контроль	+++	+++	–	–
Метанол 0,25 %	–	++	–	–
Метанол 1 %	–	++	–	–
Этанол 1 %	+	–	–	++
Этанол 5 %	–	++	–	+
Изопропанол 0,5 %	++	–	+	–
Изопропанол 2 %	++	–	++	–
Бутанол-1 0,25 %	++	+	–	–
Бутанол-1 1 %	–	++	+	–
Гексанол-1 0,25 %	++	–	+	–
Гексанол-1 1 %	–	++	++	–
Прудовик обыкновенный				
Контроль	+++	+++	–	+
Метанол 0,25 %	–	+	–	+
Метанол 1 %	–	++	–	–
Этанол 1 %	–	+	–	++
Этанол 5 %	–	++	–	++
Изопропанол 0,5 %	–	++	+	–
Изопропанол 2 %	–	+	+	–
Бутанол-1 0,25 %	+	–	+	–
Бутанол-1 1 %	–	++	+	–
Гексанол-1 0,25 %	+	–	+	–
Гексанол-1 1 %	–	++	+	–

спирта. Усиление слизеобразования под воздействием изопропанола, бутанола-1 и гексанола-1 ранее не описывалось и может рассматриваться как видоспецифический защитный механизм.

Показатели нарушений в гепатопанкреасе и поведение животных связаны. Так, чем сильнее морфологические изменения органа, тем заметнее снижение двигательной активности, реакций на раздражение и репродуктивные функции организма (прямая зависимость). Поскольку гепатопанкреас отвечает и за пищеварение, и за детоксикацию, то при его повреждении накапливаются токсины и нарушается обмен веществ. Нервная система и мышцы страдают, а это приводит к наблюдаемым изменениям. При воздействии более токсичных веществ защитные механизмы различаются: катушка роговая начинает обильнее выделять слизь, а у прудовика обыкновенного, наоборот, наблюдается угнетение активности. Вероятно, так проявляется его способ адаптации (меньшая затрата энергии).

Заключение. Алифатические спирты вызывают морфологические изменения гепатопанкреаса лёгочных пресноводных моллюсков. Степень повреждений зависит от концентрации и вида асалифатических спиртов. При воздействии метанола и этанола наблюдается расширение просветов ацинусов и вакуолизация цитоплазмы. Воздействие изопропанола, бутанола-1 и гексанола-1 приводит к выраженным структурным изменениям: дезорганизации ацинарной структуры, фрагментации эпителия и накоплению клеточного детрита. Поведенческие реакции связаны с морфологией. Катушка роговая проявляет более высокую устойчивость и активнее вырабатывает слизь (защитный механизм), в то время как у прудовика обыкновенного наблюдается выраженное угнетение двигательной активности. Откладка яиц тоже может быть рассмотрена как стресс-индуцированная реакция.

Полученные результаты подтверждают высокую чувствительность гепатопанкреаса моллюсков к воздействию алифатических спиртов и обосновывают использование морфологических изменений гепатопанкреаса в качестве биомаркера для экотоксикологического мониторинга водных экосистем.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИР по теме «Обоснование использования биомаркеров алкогольдегидрогеназы для оценки загрязнения поверхностных вод Белорусского Поозерья алифатическими спиртами» (№ ГР 20251474 от 20.10.2025).

Acknowledgements. The work was carried out as part of a scientific research project on the topic "Justification of the use of alcohol dehydrogenase biomarkers to assess the pollution of surface waters of the Belarusian Poozerie with aliphatic alcohols" (state registration number 20251474 dated 20 October 2025).

Список использованных источников

1. Сидоров, А. В. Нейромодуляторное действие пероксида водорода на центральные нейроны пищевой сети моллюска *Lymnnaea stagnalis* // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2017. – Т. 53, № 6. – С. 437–443

2. Сидоров, А. В. Модельные организмы и клеточная организация нервных центров // Наука и инновации. – 2018. – Т. 6, № 6. – С. 10–14.

3. Голубев, А. П. Динамика процессов радиоадаптации в популяциях моллюсков из водоемов Белорусского сектора зоны загрязнения ЧАЭС / А. П. Голубев // Экологический вестник. – 2012. – № 2. – С. 44–57.

4. Оценка совместного влияния температурного стресса, загрязнения и паразитарной инвазии на активность ферментов антиоксидантной системы у легочного моллюска *Lymnaea stagnalis* / А. С. Хомич, Д. В. Аксёнов-Грибанов, О. А. Бодиловская [и др.] // Сибирский экологический журнал. – 2017. – Т. 24, № 2. – С. 184–192.

5. Дромашко, С. Е. Влияние тяжелых металлов на большого прудовика *Lymnaea stagnalis* L. / С. Е. Дромашко, С. Н. Шевцова, А. С. Бабенко. – Мн.: Бел. навука, 2018. – 172 с.

6. Чиркин, А. А. Молекулярно-структурная гомология протеолитических ферментов / А. А. Чиркин, О. М. Балаева-Тихомирова. – Чебоксары: Изд. дом «Среда», 2022. – 124 с.

7. Rőszer, T. The invertebrate midintestinal gland ("hepatopancreas") is an evolutionary forerunner in the integration of immunity and metabolism / T. Rőszer // Cell and Tissue Research. – 2014. – Vol. 358, N 3. – P. 685–695. https://doi.org/10.1007/s00441-014-1985-7

8. Biomarkers of oxidative stress in freshwater bivalve mollusks (review) / Y. S. Klimova, G. M. Chuiko, D. S. Pesnya, E. S. Ivanova // Inland Water Biology. – 2020. – Vol. 13, N 4. – P. 674–683. https://doi.org/10.1134/S1995082920060073

9. Efficient treatment of alcohol wastewater and its potential pollutant control strategies / H. Wu, R. Yan, A. Li [et al.] // Journal of Water Process Engineering. – 2024. – Vol. 58. – Art. 104882. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104882

10. Салихянова, С. А. Очистка сточных вод на предприятии спиртовой промышленности / С. А. Салихянова // Вестник магистратуры. – 2019. – № 3–2. – С. 51–52.

11. Lushchak, V. I. Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals / V. I. Lushchak // Aquatic Toxicology. – 2011. – Vol. 101, N 1. – P. 13–30. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2010.10.006

12. Pathological and ultrastructural changes of *Bellamya bengalensis* under chronic carboxylic acid exposure at environmentally relevant levels: inferences from GUTS predictions and hepatopancreatic integrity assessment / P. Sharma, A. Chukwuka, S. Chatterjee [et al.] // Chemosphere. – 2024. – Vol. 361. – Art. 142542. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142542

13. The toxic and metabolic effects of 23 aliphatic alcohols in the isolated perfused rat liver / O. Strubelt, M. Deters, R. Pentz [et al.] // Toxicological Sciences. – 1999. – Vol. 49, N 1. – P. 133–142. https://doi.org/10.1093/toxsci/49.1.133

14. Ingólfsson, H. I. Alcohol's effects on lipid bilayer properties / H. I. Ingólfsson, O. S. Andersen // Biophysical Journal. – 2011. – Vol. 101, N 4. – P. 847–855. https://doi.org/10.1016/j.bpj.2011.07.013

15. Oliveira-Filho, E. C. Effects of endosulfan and ethanol on the reproduction of the snail *Biomphalaria tenagophila*: a multigeneration study / E. C. Oliveira-Filho, C. K. Grisolia, F. J. Paumgartten // Chemosphere. – 2009. – Vol. 75, N 3. – P. 398–404. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.085

16. Wu, D. Alcohol, oxidative stress, and free radical damage / D. Wu, A. I. Cederbaum // Alcohol Research and Health. – 2003. – Vol. 27, N 4. – P. 277–284.

17. Reactive oxygen species as key molecules in the pathogenesis of alcoholic fatty liver disease and nonalcoholic fatty liver disease: future perspectives / Z. Zhang, H. Yang, F. Han, P. Guo // Current Issues in Molecular Biology. – 2025. – Vol. 47, N 6. – Art. 464. https://doi.org/10.3390/cimb47060464

18. Kaviraj, A. Toxicity of methanol to fish, crustacean, oligochaete worm, and aquatic ecosystem / A. Kaviraj, F. Bhunia, N. C. Saha // International Journal of Toxicology. – 2004. – Vol. 23, N 1. – P. 55–63. https://doi.org/10.1080/10915810490265469

19. Dymond, M. K. A membrane biophysics perspective on the mechanism of alcohol toxicity / M. K. Dymond // Chemical Research in Toxicology. – 2023. – Vol. 36, N 6. – P. 793–804. https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.3c00039

20. Toxicity and Sublethal Effects of Methanol on Swimming Performance of Juvenile Florida Pompano / D. M. Baltz, E. J. Chesney, M. A. Tarr [et al.] // Transactions of the American Fisheries Society. – 2005. – Vol. 134, N 3. – P. 730–740. https://doi.org/10.1577/T04-136.1

References

1. Sidorov A. V. Neuromodulatory effects of hydrogen peroxide on central neurons in the feeding network of the mollusk *Lymnaea stagnalis*. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 493–500. https://doi.org/10.1134/S0022093017060060

2. Sidorov A. V. Model'nye organizmy i kletochnaya organizatsiya nervnykh tsentrov. *Nauka i innovatsii* [Science and Innovations], 2018, no. 6, pp. 10–14 (in Russian).

3. Golubev A. P. The dynamics of radioadaptation processes in mollusk populations in water bodies within the Belarusian sector of Chernobyl nuclear contamination zone. *Ekologicheskii vestnik* [Ecological Bulletin], 2012, no. 2, pp. 44–57 (in Russian).

4. Khomich A. S., Axenov-Gribanov D. V., Bodilovskaya O. A., Shirokova Y. A., Shchapova E. P., Lubyaga Y. A., Shatilina Z. M., Emshanova V. A., Golubev A. P. Assessment of the joint effect of thermal stress, pollution, and parasitic infestation on the activity of antioxidative enzymes in pulmonate mollusk *Lymnaea stagnalis*. *Contemporary Problems of Ecology*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 157–163. https://doi.org/10.1134/S1995425517020068

5. Dromashko S. E., Shevtsova S. N., Babenko A. S. *Influence of heavy metals on the large pond snail Lymnaea stagnalis L.* Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2018. 172 p. (in Russian).

6. Chirkin A. A., Balaeva-Tikhomirova O. M. *Molekulyarno-strukturnaya gomologiya proteoliticheskikh fermentov: monografiya*. Cheboksary, Publishing house "Sreda", 2022. 124 p. (in Russian).

7. Rőszer T. The invertebrate midintestinal gland ("hepatopancreas") is an evolutionary forerunner in the integration of immunity and metabolism. *Cell and Tissue Research*, 2014, vol. 358, no. 3, pp. 685–695. https://doi.org/10.1007/s00441-014-1985-7

8. Klimova Y. S., Chuiko G. M., Pesnya D. S., Ivanova E. S. Biomarkers of oxidative stress in freshwater bivalve mollusks (review). *Inland Water Biology*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 674–683. https://doi.org/10.1134/S1995082920060073

9. Wu H., Yan R., Li A., Huang D., Pan J., Zhao P., Xing Z. Efficient treatment of alcohol wastewater and its potential pollutant control strategies. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, vol. 58, art. 104882. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104882

10. Salikhyanova S. A. Ochistka stochnykh vod na predpriyatii spirtovoy promyshlennosti. *Vestnik magistratury* [Bulletin of the Magistracy], 2019, no. 3–2, pp. 51–52 (in Russian).

11. Lushchak V. I. Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals. *Aquatic Toxicology*, 2011, vol. 101, no. 1, pp. 13–30. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2010.10.006

12. Sharma P., Chukwuka A., Chatterjee S., Chakraborty D., Saha N. C. Pathological and ultrastructural changes of *Bellamya bengalensis* under chronic carboxylic acid exposure at environmentally relevant levels: inferences from GUTS predictions and hepatopancreatic integrity assessment. *Chemosphere*, 2024, vol. 361, art. 142542. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142542

13. Strubelt O., Deters M., Pentz R., Siegers C. P., Younes M. The toxic and metabolic effects of 23 aliphatic alcohols in the isolated perfused rat liver. *Toxicological Sciences*, 1999, vol. 49, no. 1, pp. 133–142. https://doi.org/10.1093/toxsci/49.1.133

14. Ingólfsson H. I., Andersen O. S. Alcohol's effects on lipid bilayer properties. *Biophysical Journal*, 2011, vol. 101, no. 4, pp. 847–855. https://doi.org/10.1016/j.bpj.2011.07.013

15, Oliveira-Filho E. C., Grisolia C. K., Paumgartten F. J. Effects of endosulfan and ethanol on the reproduction of the snail *Biomphalaria tenagophila*: a multigeneration study. *Chemosphere*, 2009, vol. 75, no. 3, pp. 398–404. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.085

16. Wu D., Cederbaum A. I. Alcohol, oxidative stress, and free radical damage. *Alcohol Research and Health*, 2003, vol. 27, no. 4, pp. 277–284.

17. Zhang Z., Yang H., Han F., Guo P. Reactive oxygen species as key molecules in the pathogenesis of alcoholic fatty liver disease and nonalcoholic fatty liver disease: future perspectives. *Current Issues in Molecular Biology*, 2025, vol. 47, no. 6, art. 464. https://doi.org/10.3390/cimb47060464

18. Kaviraj A., Bhunia F., Saha N. C. Toxicity of methanol to fish, crustacean, oligochaete worm, and aquatic ecosystem. *International Journal of Toxicology*, 2004, vol. 23, no. 1, pp. 55–63. https://doi.org/10.1080/10915810490265469

19. Dymond M. K. A membrane biophysics perspective on the mechanism of alcohol toxicity. *Chemical Research in Toxicology*, 2023, vol. 36, no. 6, pp. 793–804. https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.3c00039

20. Baltz D. M., Chesney E. J., Tarr M. A., Kolok A. S., Bradley M. J. Toxicity and Sublethal Effects of Methanol on Swimming Performance of Juvenile Florida Pompano. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2005, vol. 134, no. 3, pp. 730–740. https://doi.org/10.1577/T04-136.1

Информация об авторах

Вишневская Мария Викторовна – аспирант. Витебский государственный университет им. П. М. Машерова (Московский пр-т, 33, 210038, г. Витебск, Республика Беларусь). E-mail: vishnewskaya.mascha@yandex.ru.

Пинчук Полина Юрьевна – аспирант. Витебский государственный университет им. П. М. Машерова (Московский пр-т, 33, 210038, г. Витебск, Республика Беларусь). E-mail: polina_mileeva@mail.ru. https://orcid.org/0009-0006-1489-3016

Чиркин Александр Александрович – д-р биол. наук, профессор, профессор кафедры. Витебский государственный университет им. П. М. Машерова (Московский пр-т, 33, 210038, г. Витебск, Республика Беларусь). E-mail: alexchir43@gmail.com. https://orcid.org/0000-0003-4345-4136

Information about the authors

Maria V. Vishnevskaya – Postgraduate Student. Vitebsk State University named after P. M. Masherov (33, Moskovskiy Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: vishnewskaya.mascha@yandex.ru

Polina Yu. Pinchuk – Postgraduate Student. Vitebsk State University named after P. M. Masherov (33, Moskovskiy Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: polina_mileeva@mail.ru. https://orcid.org/0009-0006-1489-3016

Alexander A. Chirkin – D. Sc. (Biol.), Professor, Professor of the Department. Vitebsk State University named after P. M. Masherov (33, Moskovskiy Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: alexchir43@gmail.com. https://orcid.org/0000-0003-4345-4136