

БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ,
БИОТЕХНОЛОГИЯ И АКВАКУЛЬТУРА

УДК [594.124:591.044](265.72.04)

DOI: [10.21072/eco.2025.10.3.09](https://doi.org/10.21072/eco.2025.10.3.09)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОКСИКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
И ПАРАМЕТРОВ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО СТРЕССА ЗЕЛЁНОЙ МИДИИ
PERNA VIRIDIS ИЗ ДВУХ РАЙОНОВ ЗАЛИВА ВАН ФОНГ (ВЬЕТНАМ) *

Скуратовская Е. Н.¹, Сербин А. Д.¹, Фан Чонг Хуан², Нгуен Тхи Лан², Капранова Л. Л.¹

¹ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,

г. Севастополь, Российская Федерация,

²Приморское отделение Совместного Российско-Вьетнамского

Тропического научно-исследовательского и технологического центра, г. Нячанг, Вьетнам,

e-mail: skuratovskaya@ibss-ras.ru

Аннотация: Проведён сравнительный анализ токсикологических показателей (содержание Zn, Cu, Pb, Cd, Hg, As) и параметров окислительного стресса (уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ), активность антиоксидантных ферментов — супероксиддисмутазы (СОД), каталазы (КАТ), пероксидазы (ПЕР)) в гепатопанкреасе зелёной мидии *Perna viridis* из двух районов залива Ван Фонг, используемых для выращивания объектов марикультуры, — Ван Нинь (ВН) и Нинь Дьем (НД) (Вьетнам). Содержание исследованных химических элементов в гепатопанкреасе *P. viridis* не превышало предельно допустимых концентраций (ПДК). Содержание Hg и As в гепатопанкреасе мидий из акватории ВН было достоверно выше (в 3 и 1,5 раза соответственно) по сравнению с НД. Уровень ПОЛ и активность ПЕР в гепатопанкреасе моллюсков из района ВН достоверно превышали (в 1,5 и 1,7 раза соответственно) соответствующие показатели особей из акватории НД. Активность ключевых антиоксидантных ферментов — СОД и КАТ не различалась в гепатопанкреасе *P. viridis* из двух районов. Полученные результаты демонстрируют высокую информативность совместного применения комплекса токсикологических и биохимических показателей гепатопанкреаса зелёной мидии для оценки экотоксикологической ситуации морских прибрежных акваторий, включая марикультурные хозяйства Вьетнама.

Ключевые слова: токсикологические показатели, параметры окислительного стресса, гепатопанкреас, зелёная мидия, залив Ван Фонг

Введение

Широко распространённым объектом марикультуры Вьетнама является зелёная мидия *Perna viridis* (Linnaeus, 1758). *P. viridis* в естественной среде обитает по всему побережью страны, включая лагуны и устья рек, и постоянно подвергается воздействию локальных загрязнений. Многие районы активно используются и для аквакультуры зелёной мидии. Моллюсков выращивают на сваях и плотках с помощью специальных приспособлений — коллекторов, расположенных в прибрежных водах [Nguyen, Tran, Le, 2014; Le et al., 2025].

*Работа выполнена в рамках темы Эколан Э-3.3 «Исследование и оценка биоразнообразия некоторых морских сообществ центральных и южных вод Вьетнама» и государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Биоразнообразие как основа устойчивого функционирования морских экосистем, критерии и научные принципы его сохранения» (№ гос. регистрации 124022400148-4).

Учитывая быстрое развитие урбанизации и промышленности в центральных провинциях Вьетнама, гидрохимические и гидрологические особенности бухт и заливов, где размещаются фермы, условия выращивания моллюсков могут существенно ухудшаться, что в первую очередь отражается на их физиолого-биохимическом состоянии. Поэтому для прогнозирования экономической устойчивости марикультурных хозяйств, анализа качества морской среды в районах выращивания мидий и оценки безопасности товарной продукции для употребления в пищу человеком необходимо исследовать биохимические параметры в комплексе с содержанием токсичных веществ в организме культивируемых моллюсков [Nguyen, Tran, Le, 2014; Le et al., 2025].

Токсикологический анализ тканей позволяет сделать вывод о безопасности и возможности использования мидий в пищу, а также охарактеризовать экологическое состояние районов выращивания объектов марикультуры. К токсичным веществам, представляющим угрозу как для жизнедеятельности моллюсков, так и для человека — конечного звена трофической цепи, относятся тяжёлые металлы (ТМ) и мышьяк. Под их влиянием ослабляется иммунитет, снижается интенсивность дыхания, активность многих ферментов, замедляется рост, увеличивается смертность, уменьшается плодовитость [Зарытха и др., 2020; Le et al., 2025].

Биохимические показатели дают возможность оценить физиологическое состояние на уровне метаболических реакций, выявить патологические изменения в организме на самой ранней стадии, до появления видимых нарушений на более высоких уровнях организации. Среди наиболее информативных биохимических маркеров выделяют параметры окислительного стресса. К ним относятся активность антиоксидантных ферментов, индукция которых является неспецифической формой ответа организма на действие стресс-факторов, продукты окисления жизненно важных биомолекул — белков, липидов, нуклеиновых кислот [Бельчева и др., 2013; Климова и др., 2017; Regoli, Giuliani, 2014; Haque et al., 2017].

На основании вышеизложенного цель работы заключалась в исследовании некоторых токсикологических показателей (содержание ТМ и мышьяка) и параметров окислительного стресса в гепатопанкреасе зелёной мидии *P. viridis* из двух марикультурных хозяйств залива Ван Фонг (Вьетнам).

Материал и методы

Отбор проб проводили на двух марикультурных фермах, расположенных в заливе Ван Фонг (районы Ван Нинь и Нинь Дьем) в апреле 2025 г. (рис. 1).



Рис. 1. Районы отбора моллюсков

Характеристика района исследования. В региональной экономической структуре перво-степенное значение имеют сельское хозяйство (рыболовство и аквакультура), туризм и промышленность, включая развитие портовой деятельности. Залив Ван Фонг расположен в 50 км к северу от Нячанга, характеризуется богатым биоразнообразием и хорошим водообменом. Донные отложения в заливе в основном загрязнены органическими веществами, ТМ, источниками которых служат бытовые сточные воды, рыбоперерабатывающие предприятия, аквакультура, судоходная деятельность [Giang, 2022]. Результаты исследований в мае 2015 г. показали, что донные отложения залива Ван Фонг в основном представлены мелкозернистыми фракциями и распределены довольно равномерно, среднее соотношение частиц ила и глины ($< 0,062$ мм) относительно высокое. Концентрации тяжёлых металлов (Zn, Cu и Pb) и биогенов (C, N, P) в донных отложениях находились в пределах, установленных Национальным техническим регламентом по качеству донных отложений (QCVN 43:2012/BTNMT). Однако в последние годы, в связи с активной экономической деятельностью, наблюдается ухудшение экологического состояния залива за счёт повышения содержания токсичных веществ в воде и донных отложениях [Pham, 2017].

Ван Нинь (ВН) находится в северной части залива Ван Фонг. На качество морской среды ВН существенное влияние оказывают развитие аквакультуры, портовые загрузки, интенсивное судоходство и рыболовство [Kim, 2023]. Нинь Дьем (НД) — район в южной части залива. В прибрежной зоне НД находятся промышленные площадки (включая соляные заводы и индустриальные парки), прибрежные лагуны и примыкающие морские районы, которые используются для рыболовства и аквакультуры [Khanh Hoa investment ... , 2023, Pham, 2017].

Биологический анализ моллюсков. Мидий в аэрируемых контейнерах транспортировали в лабораторию, где производили отбор моллюсков длиной раковины 80–90 мм с последующим биологическим анализом. Из каждого района отбирали в среднем по 40 экземпляров. Размерно-массовые характеристики исследованных экземпляров представлены в таблице 1.

Таблица 1

Размерно-массовые характеристики зелёной мидии *Perna viridis* из двух районов ($M \pm m$)

Параметр	Нинь Дьем (n = 40)	Ван Нинь (n = 40)
L, мм	$84,63 \pm 1,03$	$87,08 \pm 0,77$
D, мм	$23,05 \pm 0,44$	$23,97 \pm 0,35$
H, мм	$34,25 \pm 0,38$	$35,89 \pm 0,46$
W, г	$36,02 \pm 1,34$	$34,22 \pm 1,14$

Примечание: L — длина, D — ширина, H — высота, W — масса моллюска.

Токсикологические и биохимические показатели определяли в гепатопанкреасе — основном органе детоксикации и накопления токсичных веществ, включая тяжёлые металлы [Ковековдова и др., 2018].

Токсикологический анализ. Химические элементы (ХЭ) — ртуть (Hg), свинец (Pb), кадмий (Cd), мышьяк (As), медь (Cu), цинк (Zn) определяли в гепатопанкреасе моллюсков на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой PlasmaQuant MS Elite (Analytik Jena AG, Германия) на базе Научно-образовательного центра коллективного пользования «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Для этого использовали суммарные образцы тканей, полученные от 3–4 особей, образцы сушили до постоянной массы в сушильном шкафу при $+105$ °С. Исследования проводили в трёх повторностях.

Биохимические методы исследования. Материалом для биохимических исследований служил гепатопанкреас (индивидуальные образцы тканей от 12 экз. из каждого района). Гепатопанкреас гомогенизировали в калийфосфатном буфере (рН 7,4). Для получения супернатантов гомогенаты центрифугировали 15 мин при 10 000 g и температуре 0–4 °С в рефрижераторной центрифуге. Все биохимические показатели определяли в супернатантах.

Содержание вторичных продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) — ТБК-активных продуктов (ТБК-АП) (нмоль ТБК-АП/мг белка) регистрировали по реакции с тиобарбитуровой кислотой [Стальная, Гаришвили, 1977]. Активность супероксиддисмутазы (СОД) (усл. ед./мг белка/мин) анализировали в системе нитросинийтетразолиевый — феназинметасульфат — никотинамиддинуклеотид (НСТ-ФМС-НАДН) [Nishikimi, Appaji, Yagi, 1972], активность каталазы (КАТ) (мкат/мг белка) — по реакции взаимодействия перекиси водорода с молибдатом аммония [Королюк и др., 1988], активность пероксидазы (ПЕР) — с использованием бензидинового реактива [Практикум по ... , 1981, с. 86–87]. Все биохимические показатели рассчитывали на белок. Белок определяли методом Лоури [Lowry et al., 1951]. Измерения проводили в трёх повторностях.

Статистический анализ. Результаты обрабатывали статистически, вычисляли среднее арифметическое и ошибку средней. Достоверность различий между выборками оценивали с применением U-критерия Манна — Уитни. Различия считали достоверными при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Содержание ХЭ в гепатопанкреасе зелёной мидии распределялось в следующей последовательности: НД — $Zn > Cu > As > Pb > Cd > Hg$, ВН — $Zn > As > Cu > Pb > Cd > Hg$. В обоих районах концентрации ХЭ не превышали предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных в России и Вьетнаме. В то же время содержание Hg и As в гепатопанкреасе моллюсков из акватории ВН было достоверно выше (в 3 и 1,5 раза соответственно) по сравнению с НД ($p < 0,05$) (табл. 2).

Таблица 2

Содержание тяжёлых металлов и мышьяка ($M \pm m$) (мг/кг сырой массы) в гепатопанкреасе зелёной мидии из двух районов залива Ван Фонг

ХЭ	ПДК ¹	ПДК ²	Нинь Дьем (n = 8)	Ван Нинь (n = 8)
Hg	0,2	0,5	$0,015 \pm 0,002$	$0,045 \pm 0,003^*$
Pb	10	1,5	$0,42 \pm 0,04$	$0,34 \pm 0,04$
Cd	2,0	2,0	$0,20 \pm 0,02$	$0,17 \pm 0,006$
As	5,0	н/н	$2,76 \pm 0,16$	$4,07 \pm 0,4^*$
Cu	30	н/н	$2,91 \pm 0,37$	$2,38 \pm 0,14$
Zn	200	н/н	$14,91 \pm 0,77$	$13,53 \pm 0,58$

Примечание: * — достоверность различий между значениями показателей в гепатопанкреасе мидий из двух районов (U-критерий Манна — Уитни, $p \leq 0,05$); 1 — согласно СанПиН 2.3.2.1078-01 и МБТ 5061-89 (Россия); 2 — согласно Национальному техническому регламенту о пределах загрязнения тяжёлыми металлами в пищевых продуктах QCVN 8-2:2011/ВУТ (Вьетнам); н/н — не нормируется.

Содержание ТБК-АП и активность ПЕР были достоверно выше (в 1,5 и 1,7 раза соответственно) в гепатопанкреасе мидий из ВН по сравнению с соответствующими показателями особей из акватории НД ($p < 0,05$). Активность СОД и КАТ не различалась у моллюсков из двух районов (рис. 2).

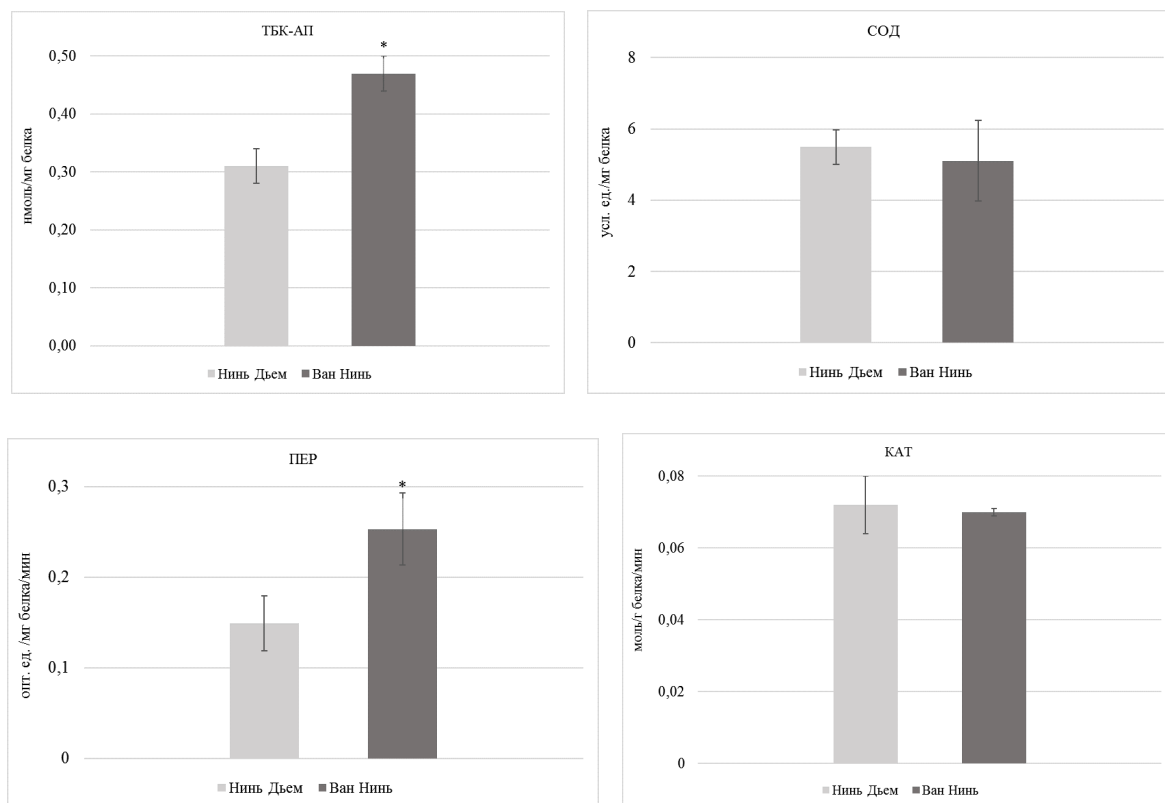


Рис. 2. Показатели прооксидантно-антиоксидантной системы гепатопанкреаса зелёной мидии из двух районов залива Ван Фонг. Примечание: ТБК-АП — ТБК-активные продукты, СОД — супероксиддисмутаза, КАТ — каталаза, ПЕР — пероксидаза, * — достоверность различий между значениями показателей из двух районов (U-критерий Манна — Уитни, $p \leq 0,05$), Нинь Дьем: $n = 12$, Ван Нинь: $n = 12$.

Содержание ХЭ в тканях гидробионтов обусловлено комплексом различных факторов, включающих физико-химические свойства элементов, биологические особенности отдельных видов, химико-экологические условия среды, в том числе содержание ХЭ в воде и грунтах [Ковековдова, Симоконь, Кику, 2006; Зарыхта и др., 2020; Le et al., 2025].

Количественный анализ ХЭ в гепатопанкреасе мидий из районов исследования показал, что их концентрации не превышали ПДК, в то же время содержание Hg и As было достоверно выше у моллюсков из акватории ВН. Известно, что мидии обладают способностью накапливать ТМ и мышьяк в концентрациях, во много раз превышающих их уровень в окружающей среде. Кроме того, содержание ТМ и мышьяка в их тканях сильно коррелирует с содержанием в окружающей среде [Le et al., 2025]. Поэтому повышенные концентрации Hg и As у моллюсков из района ВН, вероятно, обусловлены более высоким их содержанием в акватории ВН по сравнению с НД. Ранее другими исследователями было выявлено значительное накопление ТМ *P. viridis* в различных районах Вьетнама. Например, было отмечено, что концентрации тяжёлых металлов (Pb и Cr) в мидиях из устья реки Хан превышали ПДК [Nguyen, Tran, Le, 2014]. Обнаружены высокие концентрации Zn (до 105 мг/кг сухого веса) и Cu (до 17,8 мг/кг сухого веса) в тканях мидий из прибрежной акватории Хайфонга [Le et al., 2025].

Сопоставление данных токсикологического анализа и показателей окислительного стресса гепатопанкреаса мидий из двух локаций позволили установить определённые особенности. Содержание ТБК-АП и активность ПЕР были достоверно выше у экземпляров из акватории ВН, концентрации Hg и As в гепатопанкреасе которых превышали соответствующие значения моллюсков из района НД. Известно, что многие токсичные элементы, включая Hg и As, обладают прооксидантными свойствами, стимулируя процессы ПОЛ и развитие окислительного стресса [Livingstone, 2003; Климова и др., 2017]. В нашем исследовании повышение концентрации Hg и As, вероятно, привело к усилению процессов ПОЛ и, как следствие, увеличению уровня ТБК-АП в гепатопанкреасе мидий из акватории ВН. Рост содержания продуктов ПОЛ в тканях моллюсков с высоким содержанием ТМ отмечался ранее другими исследователями [Бельчева и др., 2013; Климова и др., 2017; Verlecar, Jena, Chainy, 2007; Faria et al., 2009].

Усиление процессов ПОЛ в гепатопанкреасе мидий из акватории ВН сопровождалось повышением активности ПЕР — фермента антиоксидантной защиты. Своевременная индукция антиоксидантных ферментов является важнейшей защитной реакцией при развитии окислительного стресса, вызванного воздействием неблагоприятных факторов [Климова и др., 2017; Solé, 2000]. Активность АО-ферментов, включая ПЕР, так же как и содержание продуктов ПОЛ, являются маркерами оксидативных поражений, причинами которых могут быть ТМ [Binelli et al., 2015; Климова и др., 2017]. ПЕР нейтрализует как неорганические, так и органические перекиси, включая перекиси липидов, и обрывает тем самым цепное ПОЛ. Таким образом, повышение активности ПЕР в гепатопанкреасе *P. viridis* из акватории ВН отражает адаптивную компенсаторную реакцию организма в условиях интенсификации ПОЛ. Одновременное повышение уровня ПОЛ и активности КАТ было отмечено у двустворчатого моллюска *Dreissena polymorpha* как в районах с высоким содержанием ТМ (Pb, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Mn, Cd) [Климова и др., 2017], так и в экспериментальных условиях при воздействии Cd (34 мг/л) [Faria et al., 2010], Hg (45 мкг/л) [Verlecar, Jena, Chainy, 2007]. Увеличение активности КАТ и глутатионпероксидазы в ответ на повышение уровня ПОЛ в пищеварительной железе и жабрах мидии *Crenomytilus grayanus* из бухты Горностай сопровождалось более высоким содержанием ТМ (Fe, Cu, Pb) по сравнению с б. Алексеевка (залив Петра Великого, Японское море) [Бельчева и др., 2013].

Следует отметить, что активность ключевых антиоксидантных ферментов — СОД и КАТ не различалась у моллюсков из двух районов. Данный факт может свидетельствовать о том, что окислительные процессы не настолько интенсивны, а концентрации токсичных элементов (включая Hg и As) в гепатопанкреасе *P. viridis* из района ВН не настолько высоки (по сравнению с НД), чтобы вызвать активацию/ингибирование СОД и КАТ.

Выводы

На основании полученных результатов можно заключить следующее:

- концентрации ТМ (Zn, Cu, Pb, Cd, Hg) и мышьяка в гепатопанкреасе *P. viridis* не превышали установленных в России и Вьетнаме ПДК. У моллюсков из района ВН содержание Hg и As было достоверно выше соответствующих показателей из района НД, что может свидетельствовать о более высоком уровне содержания данных элементов в акватории ВН по сравнению с НД. Повышенное содержание Hg и As в гепатопанкреасе мидий из ВН сопровождалось увеличением уровня ПОЛ и активности ПЕР;

- рост активности ПЕР можно рассматривать как адаптивную компенсаторную реакцию организма в условиях интенсификации ПОЛ, направленную на нейтрализацию органических перекисей. Активность ключевых антиоксидантных ферментов — СОД и КАТ не различалась у моллюсков из двух районов, это может свидетельствовать о том, что окислительные процессы

не настолько интенсивны, а концентрации ТЭ (включая Hg и As) в гепатопанкреасе *P. viridis* из района ВН не настолько высоки (по сравнению с НД), чтобы вызвать активацию/ингибирование СОД и КАТ.

Полученные результаты демонстрируют высокую информативность совместного применения комплекса токсикологических и биохимических показателей гепатопанкреаса зелёной мидии для оценки экотоксикологической ситуации морских прибрежных акваторий, включая марикультурные хозяйства Вьетнама.

Список литературы

1. Бельчева Н. Н., Истомина А. А., Слободскова В. В., Челомин В. П. Использование молекулярных биомаркеров окислительного стресса для оценки загрязнения морской среды // Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки. – 2013. – № 3. – С. 87–92. – <https://elibrary.ru/plrqdq>
2. Зарыхта В. В., Zhang Z. H., Кузнецова Т. В., Озерский П. В., Feng Y. J. Дифференциальное накопление тяжелых металлов в мягких тканях трех видов двустворчатых моллюсков из реки Сунгари вблизи г. Харбина (Китай) // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 119–126. – <https://doi.org/10.31857/S0044452920020114>
3. Климова Я. С., Чуйко Г. М., Ганеева М. В., Песня Д. С. Использование показателей окислительного стресса двустворчатых пресноводных моллюсков *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) как биомаркеров для оценки воздействия хронического антропогенного загрязнения различных участков Рыбинского водохранилища // Сибирский экологический журнал. – 2017. – № 2. – С. 210–217. – <https://doi.org/10.15372/SEJ20170210>
4. Ковековдова Л. Т., Симоконь М. В., Кику Д. П. Токсичные элементы в промысловых гидробионтах прибрежных акваторий северо-западной части Японского моря // Вопросы рыболовства. – 2006. – Т. 7, № 1. – С. 185–190. – <https://elibrary.ru/lkqunj>
5. Ковековдова Л. Т., Симоконь М. В., Наревич И. С., Корольков К. А. Токсичные элементы в промысловых гидробионтах дальневосточных морей // Прибрежно-морская зона Дальнего Востока России: от освоения к устойчивому развитию : Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. ... «Мор. экология» ДВФУ, Владивосток, 8–10 нояб. 2018 г. / Дальневост. федер. ун-т [и др.] ; науч. ред.: Н. К. Христофорова, В. Ю. Цыганков. – Владивосток : ДВФУ, 2018. – С. 57–59.
6. Королюк М. А., Иванова Л. И., Майорова И. Г., Токарев В. Е. Метод определения активности каталазы // Лабораторное дело. – 1988. – № 1. – С. 16–19. – <https://elibrary.ru/sicxej>
7. Практикум по физико-химическим методам в биологии / под ред. Ф. Ф. Литвина. – Москва : Изд-во МГУ, 1981. – 240 с.
8. Стальная И. Д., Гаришвили Т. Г. Метод определения малонового диальдегида с помощью тиобарбитуровой кислоты // Современные методы в биохимии / под ред. В. Н. Ореховича. – Москва : Медицина, 1977. – С. 66–68.
9. Binelli A., Della Torre C., Magni S., Parolini M. Does zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) represent the freshwater counterpart of *Mytilus* in ecotoxicological studies? A critical review // Environmental Pollution. – 2015. – Vol. 196. – P. 386–403. – <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.10.023>
10. Faria M., Carrasco L., Diez S., Riva M. C., Bayona J. M., Barata C. Multi-biomarker responses in the freshwater mussel *Dreissena polymorpha* exposed to polychlorobiphenyls and metals // Comparative Biochemistry and Physiology. Pt. C: Toxicology & Pharmacology. – 2009. – Vol. 149, iss. 3. – P. 281–288. – <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2008.07.012>

11. Faria M., Huertas D., Soto D. X., Grimalt J. O., Catalan J., Riva M. C., Barata C. Contaminant accumulation and multi-biomarker responses in field collected zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) and crayfish (*Procambarus clarkii*), to evaluate toxicological effects of industrial hazardous dumps in the Ebro river (NE Spain) // *Chemosphere*. – 2010. – Vol. 78, iss. 3. – P. 232–240. – <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.11.003>
12. Giang L. Khanh Hoa province // ASEM Connect. – 2022. – URL: <https://asemconnect.vietnam.gov.vn/default.aspx?ID1=2&ID8=11193&ZID1=12&utm>. – Publ. date: 20.07.2022.
13. Haque S., Mondal S., Kundu D., Ghosh A. R. Effect of multiple polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) on liver of three teleostean fishes *Labeo bata*, *Labeo rohita* and *Cirrhinus mrigala* in Burdwan Loco Tank, Burdwan, West Bengal, India // *Austin Environmental Sciences*. – 2017. – Vol. 2, iss. 1. – Art. 1017. – <https://doi.org/10.26420/austinenvironsci.2017.1017>
14. Khanh Hoa investment promotion handbook in 2023 / Dep. of Planning and Investment of Khanh Hoa Province ; ed. Ho Oanh. – Khanh Hoa : [s. n.], 2023. – 101 p. – URL: https://ipa.khanhhoa.gov.vn/admin/Uploads/FileVanBan/2023/10/KHANH%20HOA%20INVESTMENT%20PROMOTION%20HANDBOOK%20IN%202023_05235042901.pdf (access date: 01.08.2025).
15. Kim S. Strict handling of aquaculture not following planning // *Nong Nghiep & Moi Truong*. – 2023. – URL: <https://van.nongnghiepmoitruong.vn/strict-handling-of-aquaculture-not-following-planning-d369512.html>. – Publ. date: 25.11.2023.
16. Le S. X., Nguyen B. V., Bui H. T. M., Le N. V., Dinh H. V., Le K. D., Cao S. T., Nguyen K. Bioaccumulation of selected heavy metals in bivalve molluscs from Northeastern Vietnam: implications for safe seafood utilization // *Research in Ecology*. – 2025. – Vol. 7, iss. 3. – P. 115–134. – <https://doi.org/10.30564/re.v7i3.9805>
17. Livingstone D. R. Oxidative stress in aquatic organisms in relation to pollution and aquaculture // *Revue de Médecine Vétérinaire*. – 2003. – Vol. 154, iss. 6. – P. 427–430.
18. Lowry O. H., Rosebrough N. J., Farr A. L., Randall R. J. Protein measurement with the Folin phenol reagent // *Journal of Biological Chemistry*. – 1951. – Vol. 193, iss. 1. – P. 265–275.
19. Nguyen V. K., Tran D. V., Le H. Y. N. Contents of heavy metals Hg, Cd, Pb, Cr in bivalves from estuaries in Central Vietnam // *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*. – 2014. – Vol. 14, no. 4. – P. 385–391. – <https://doi.org/10.15625/1859-3097/14/4/5825>
20. Nishikimi M., Appaji N., Yagi K. The occurrence of superoxide anion in the reaction of reduced phenazine methosulfate and molecular oxygen // *Biochemical and Biophysical Research Communications*. – 1972. – Vol. 46, iss. 2. – P. 849–854. – [https://doi.org/10.1016/s0006-291x\(72\)80218-3](https://doi.org/10.1016/s0006-291x(72)80218-3)
21. Pham H. T. Quality of bottom sediment environment in Van Phong Bay, Khanh Hoa province // *Tap chi Moi truong*. – 2017. – URL: <https://tapchimoitruong.vn/nghien-cuu-23/Ch%E1%BA%A5t-l%C6%B0%E1%BB%A3ng-m%C3%B4i-tr%C6%B0%E1%BB%9Dng-tr%E1%BA%A7m-t%C3%ADch-%C4%91%C3%A1y-t%E1%BA%A1i-v%E1%BB%8Bnh-V%C3%A2n-Phong%2C-t%E1%BB%89nh-Kh%C3%A1nh-H%C3%B2a-14439>. – Publ. date: 10.07.2017.
22. Regoli F., Giuliani M. Oxidative pathways of chemical toxicity and oxidative stress biomarkers in marine organisms // *Marine Environmental Research*. – 2014. – Vol. 93. – P. 106–117. – <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.07.006>

23. Solé M. Assessment of the results of chemical analyses combined with the biological effects of organic pollution on mussels // TrAC. Trends in Analytical Chemistry. – 2000. – Vol. 19, iss. 1. – P. 1–9. – [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(99\)00174-0](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(99)00174-0)
24. Verlecar X. N., Jena K. B., Chainy G. B. N. Biochemical markers of oxidative stress in *Perna viridis* exposed to mercury and temperature // Chemico-Biological Interactions. – 2007. – Vol. 167, iss. 3. – P. 219–226. – <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2007.01.018>

COMPARATIVE ANALYSIS OF TOXICOLOGICAL INDICATORS AND OXIDATIVE STRESS PARAMETERS IN *PERNA VIRIDIS* GREEN MUSSELS FROM VAN PHONG BAY (VIETNAM)

Skuratovskaya E. N.¹, Serbin A. D.¹, Phan Trung Hoang², Nguyen Thi Lan², Kapranova L. L.¹

¹A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,

²Coastal Branch of the Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center, Nha Trang City, Khanh Hoa Province, Viet Nam,
e-mail: skuratovskaya@ibss-ras.ru

Abstract: A comparative analysis of toxicological (content of Zn, Cu, Pb, Cd, Hg, As) and oxidative stress parameters (level of lipid peroxidation (LPO), activity of antioxidant enzymes — superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (PER)) in the hepatopancreas of green mussel *Perna viridis* from two mariculture areas in Van Phong Bay — Van Ninh (VN) and Ninh Diem (ND) (Vietnam) was carried out. The content of chemical elements in the hepatopancreas of *P. viridis* did not exceed the maximum permissible concentrations (MPC). The concentrations of Hg and As in the hepatopancreas of mussels from the VN water area were significantly higher (3 and 1.5 times, respectively) compared to the ND water area. The level of LPO and PER activity in the hepatopancreas of mollusks from the VN area were significantly higher (1.5 and 1.7 times, respectively) than the corresponding parameters of individuals from the ND water area. The activity of the key antioxidant enzymes SOD and CAT did not differ in the hepatopancreas from the two areas. The results obtained demonstrate the high informativeness of the combined application of a complex of toxicological and oxidative stress parameters of green mussel hepatopancreas for assessing the ecotoxicological situation in marine coastal areas, including mariculture farms in Vietnam.

Keywords: toxicological parameters, oxidative stress parameters, hepatopancreas, green mussel, Van Phong Bay

Сведения об авторах

Скуратовская Екатерина Николаевна	кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: skuratovskaya@ibss-ras.ru
Сербин Артём Дмитриевич	ведущий инженер, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: serbin_ad@ibss.ru

Фан Чонг Хуан	кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Приморское отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра, 30 Нгуен Тхиен Тхуат, Нячанг, Вьетнам, e-mail: tronghuan1369@yahoo.com
Нгуен Тхи Лан	кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Приморское отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра, 30 Нгуен Тхиен Тхуат, Нячанг, Вьетнам, e-mail: nguyenlanst1805@gmail.com
Капранова Лариса Леонидовна	кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: lkapr@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 12.09.2025
Принята к публикации 15.10.2025