

Научная статья  
УДК 615.32.099:639.41.043.2  
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2026-2-105-114>  
EDN RKMDYP

## Оценка цитотоксичности водного экстракта фикобилипротеинов, перспективной кормовой добавки для гигантской устрицы *Magallana gigas* (модель *in vitro*)

А. Ю. Андреева, Т. А. Кухарева, А. Б. Боровков,  
М. С. Подольская<sup>✉</sup>, А. А. Ткачук, Т. М. Новикова

Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН,  
Севастополь, Россия, [podolskayams@ibss-ras.ru](mailto:podolskayams@ibss-ras.ru)<sup>✉</sup>

**Аннотация.** Устойчивое развитие аквакультуры гигантской устрицы (*Magallana gigas*) в России встречает ряд ограничений, основными из которых являются дефицит доступной молодежи, выращенной в российских питомниках, и высокая зависимость от импорта спата из-за рубежа. Для преодоления этих препятствий необходимо не только расширение сети специализированных питомников, но и внедрение инновационных технологий, способствующих улучшению условий содержания и физиологического состояния маточного стада в преднерестовый период. Одним из перспективных направлений является использование природных биологически активных веществ в качестве функциональных кормовых добавок. В частности, фикобилипротеины (ФБП), экстрагируемые из микроводоросли *Arthrospira platensis* (спирулины), обладают выраженными антиоксидантными, противовоспалительными и иммуномодулирующими свойствами. Включение их в рацион маточного стада производителей молодежи перспективно для снижения негативных последствий содержания в искусственной среде питомников в преднерестовый период. Цель исследования – в условиях *in vitro* оценить острую токсичность водного экстракта ФБП для гемоцитов устриц и определить диапазон безопасных концентраций, при котором отсутствуют выраженные неблагоприятные эффекты на клеточном уровне. Гемоциты инкубировали в стерильной морской воде с экстрактом ФБП в концентрациях 2, 20 и 200 мкг/мл в течение 1 и 3 ч. Экстракт ФБП в концентрации 2–200 мкг/мл не вызывал гибели клеток гемолимфы, не влиял на их функциональную активность и не индуцировал в них апоптоз. Однако добавление экстракта ФБП в концентрации 200 мкг/мл приводило к повреждению ДНК с первого часа инкубации. Результаты показали низкую цитотоксичность экстракта в отношении гемоцитов гигантской устрицы при его концентрации в среде ниже 200 мкг/мл.

**Ключевые слова:** фикобилипротеины, гигантская устрица, гемоциты, смертность, повреждение ДНК, острая токсичность

**Благодарности:** работа выполнена за счет средств гранта РФФИ № 24-16-00245 «Оценка иммуномодулирующих и антиоксидантных свойств водного экстракта фикобилипротеинов (С-фикоцианин, В-фикоэритрин), перспективной кормовой добавки для гигантской устрицы *Magallana gigas*».

**Для цитирования:** Андреева А. Ю., Кухарева Т. А., Боровков А. Б., Подольская М. С., Ткачук А. А., Новикова Т. М. Оценка цитотоксичности водного экстракта фикобилипротеинов, перспективной кормовой добавки для гигантской устрицы *Magallana gigas* (модель *in vitro*) // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2026. № 2. С. 105–114. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2026-2-105-114>. EDN RKMDYP.

Original article

## Assessment of the cytotoxicity of an aqueous extract of phycobiliproteins, a promising feed additive for the giant oyster *Magallana gigas* (*in vitro* model)

A. Yu. Andreeva, T. A. Kukhareva, A. B. Borovkov,  
M. S. Podolskaya<sup>✉</sup>, A. A. Tkachuk, T. M. Novikova

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,  
Sevastopol, Russia, [podolskayams@ibss-ras.ru](mailto:podolskayams@ibss-ras.ru)<sup>✉</sup>

**Abstract.** The sustainable development of the aquaculture of the giant oyster (*Magallana gigas*) in Russia is facing a number of constraints, the main of which are the shortage of available juveniles raised in Russian nurseries and high dependence on imports of spat from abroad. To overcome these obstacles, it is necessary not only to expand the network of specialized nurseries, but also to introduce innovative technologies that help improve the conditions of maintenance and the physiological state of the breeding stock in the pre-spawning period. One of the promising areas is the use of natural biologically active substances as functional feed additives. In particular, phycobiliproteins (FBPs) extracted from the microalgae *Arthrospira platensis* (spirulina) have pronounced antioxidant, anti-inflammatory, and immunomodulatory properties. Their inclusion in the diet of the broodstock of juvenile producers is promising to reduce the negative consequences of keeping nurseries in an artificial environment during the pre-spawning period. The aim of the study was to evaluate the acute toxicity of the aqueous FBP extract to oyster hemocytes *in vitro* and determine the range of safe concentrations at which there are no pronounced adverse effects at the cellular level. Hemocytes were incubated in sterile seawater with FBP extract at concentrations of 2, 20, and 200 micrograms/ml for 1 hour and 3 hours. FBP extract at a concentration of 2-200 micrograms/ml did not cause hemo-lymph cell death, did not affect their functional activity, and did not induce apoptosis in them. However, the addition of FBP extract at a concentration of 200 micrograms/ml led to DNA damage from the first hour of incubation. The results showed low cytotoxicity of the extract against hemocytes of the giant oyster at its concentration in the medium below 200 micrograms/ml.

**Keywords:** phycobiliproteins, the giant oyster (*Magallana gigas*), hemocytes, mortality, DNA damage, acute toxicity

**Acknowledgments:** the work was funded by the Russian Science Foundation grant No. 24-16-00245 "Assessment of the immunomodulatory and antioxidant properties of an aqueous extract of phycobiliproteins (C-phycoerythrin, B-phycoerythrin), a promising feed additive for the giant oyster *Magallana gigas*".

**For citation:** Andreeva A. Yu., Kukhareva T. A., Borovkov A. B., Podolskaya M. S., Tkachuk A. A., Novikova T. M. Assessment of the cytotoxicity of an aqueous extract of phycobiliproteins, a promising feed additive for the giant oyster *Magallana gigas* (*in vitro* model). *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry.* 2026;2:105-114. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2026-2-105-114>. EDN RKMDYP.

## Введение

Черное море считается одним из перспективных и благоприятных регионов для развития аквакультуры двустворчатых моллюсков. В настоящее время наиболее популярным видом для искусственного выращивания на фермах Черноморского побережья России и Приморья является гигантская устрица *Magallana gigas*. К 2020 г. в Черном море было зарегистрировано более 30 аквакультурных ферм, ориентированных на выращивание устриц [1].

Одним из факторов, ограничивающих устойчивое развитие устрицеводства в России, является разработка и внедрение технологий по получению молоди устриц в питомниках, поскольку закупка иностранного спата подразумевает высокую стоимость и смертность посадочного материала на этапе транспортировки и адаптации к новым условиям обитания [2]. При этом целесообразна разработка научно обоснованных рекомендаций по увеличению эффективности нереста производителей молоди и поддержания высокого качества маточного стада. В устричных питомниках с круглогодичным режимом получения спата производители (половозрелые устрицы) проходят обязательный этап кондиционирования, который влечет за собой изъятие моллюсков из естественной среды обитания и содержание в изолированных бассейнах с контролируемыми условиями среды на период времени до 2–3 мес [1]. Перемещение моллюсков из естественной среды обитания подразумевает обязательный этап механической чистки раковины от организмов-обрастателей и выдерживание в пресной воде для избавления от сопутствующих гидробионтов [3]. Показано, что механическое воздействие на раковину и колебания солености среды сопровождаются повышением

концентрации катехоламинов в гемолимфе устриц и развитием у них состояния острого физиологического стресса, что, в свою очередь, снижает фертильность особей, угнетает механизмы врожденного иммунитета и индуцирует развитие окислительного стресса [4, 5]. Общеизвестно, что эффективность нереста двустворчатых моллюсков напрямую определяется состоянием их здоровья. Таким образом, содержание производителей вне естественной среды обитания предполагает включение в технологический процесс мероприятий, направленных на снижение негативных последствий этапа кондиционирования на функционирование защитных систем и процесс нереста [6].

В современной аквакультуре при разработке стратегий повышения резистентности гидробионтов к действиям неблагоприятных факторов среды наблюдается устойчивая тенденция к применению кормовых добавок, содержащих биологически активные компоненты различного происхождения [7]. В период кондиционирования основу рациона производителей устриц в питомниках составляют специализированные смеси микроводорослей [1]. Вместе с тем многие виды микроводорослей, не являющиеся пищевым объектом для устриц, содержат комплекс различных биологически активных веществ, обладающих широким спектром иммуномодулирующих, антиоксидантных, противовирусных, антибактериальных, противогрибковых, противовоспалительных и других свойств [8]. При этом предпочтительным является не включение нового вида в рацион объектов культивирования, а применение экстрактов и изолированных биологически активных веществ в качестве добавок к основной смеси микроводорослей. Многочисленные исследо-

вания свидетельствуют о том, что кормовые биодобавки из микроводорослей положительно влияют на рост и выживаемость объектов аквакультуры, а также способствуют стимуляции неспецифических защитных механизмов, включая иммунитет, антиоксидантный комплекс и др. Так, экстракт из микроводоросли *Dunaliella* положительно влиял на рост, маркерные показатели иммунитета и устойчивость к болезням у черных тигровых креветок (*Penaeus monodon*) [9]. Применение докозагексаеновой и арахидонової кислот, полученных из микроводорослей, в рационе тихоокеанской белой креветки (*Litopenaeus vannamei*) оказало стимулирующее воздействие на показатели неспецифического иммунитета (общее количество гемоцитов, активность ферментов супероксиддисмутазы), а также повышало выживаемость особей после инфицирования бактериями *Vibrio harveyi* [10]. При добавлении в воду супернатанта, содержащего мареннин – внеклеточный синий пигмент диатомовых водорослей *Haslea ostrearia* – отмечалась высокая выживаемость личинок мидий *Mytilus edulis* и гребешка *Placopecten magellanicus* [11]. Широкое практическое применение в аквакультуре находят фикобилипротеины (ФБП), которые синтезируются цианобактерией *Arthrospira (Spirulina) platensis* [12], в частности, С-фикоцианин (С-ФЦ). Выявлен высокий биологический потенциал С-ФЦ, обусловленный антиоксидантными, противовоспалительными, гепатопротекторными и противоопухолевыми свойствами [13]. Однако влияние ФБП на здоровье промысловых видов двустворчатых моллюсков изучено слабо, при этом этапе применения биологически активных добавок в кормах для двустворчатых моллюсков должно предшествовать экспериментальное выявление диапазона концентраций, в котором отсутствуют выраженные неблагоприятные последствия для организма объектов культивирования.

Для определения острой цитотоксичности перспективных кормовых добавок в отношении водных беспозвоночных животных широко применяют модели *in vitro* на клетках гемолимфы – гемоцитах. Таким образом, целью работы является анализ острой токсичности различных концентраций водного экстракта ФБП из спирулины *A. platensis* в отношении гемоцитов гигантских устриц. В условиях *in vitro* оценивалось влияние трех различных концентраций экстракта (2, 20 и 200 мкг/мл) на смертность и функциональную активность гемоцитов, степень повреждения их ДНК, а также индукцию в них апоптоза.

### Материалы и методы

Экстракцию ФБП проводили из биомассы цианобактерии *Arthrospira (Spirulina) platensis* (Nordstedt) Gomont, штамм которой был предоставлен Научно-образовательным центром коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А. О. Кова-

левского РАН» (ФИЦ ИнБЮМ) «Коллекция гидробионтов Мирового океана». Культивирование осуществляли в условиях открытых бассейнов опытно-экспериментального микроводорослевого производства ФИЦ ИнБЮМ (г. Севастополь) с использованием стандартной питательной среды Zarrouk. Образцы биомассы спирулины подвергали двукратному циклу замораживания-оттаивания для лизиса клеток. Гомогенизированную массу ресуспендировали в дистиллированной воде ( $5 \pm 1$  °C) в течение 24 ч. Центрифугирование осуществляли на центрифуге Eppendorf 5430R (6 000 об/мин, RCF = 4 226 g, 10 мин, 4 °C). Полученный экстракт хранили при -18 °C в темноте. Измерения содержания пигментов в экстракте проводили на спектрофотометре UV-2600i (Shimadzu, Япония) в диапазоне 400–800 нм (шаг 0,1 нм) в области характеристических максимумов поглощения R-фикоцианина R-ФЦ (615 нм), С-ФЦ (620 нм) и аллофикоцианина (АФЦ) (650 нм), а также при 750 нм (для учета неспецифического поглощения раствора). Концентрацию пигментов оценивали по следующему уравнению [14]:

$$C(\text{ФБП}) = 0,166 D_{620} - 0,091 D_{650},$$

где  $D$  – значения оптической плотности для соответствующих длин волн.

Концентрация полученного экстракта составляла 4 000–4 500 мкг/мл [15].

Для эксперимента *in vitro* были отобраны взрослые диплоидные устрицы *Magallana gigas* (5 лет, вес  $72,1 \pm 6,2$  г, длина раковины  $10,8 \pm 1,9$  см,  $n = 125$ ) на марикультурной ферме в районе г. Севастополя (ООО «Марикультура»). Отбор моллюсков проводили в период функционального покоя (при температуре воды 15–16 °C). Для акклиматизации к лабораторным условиям моллюсков размещали в аэрируемых аквариумах объемом 50–70 л. В течение 7 дней устрицы находились в условиях, приближенных к естественной среде, со следующими параметрами: концентрация кислорода  $7\text{--}8$  мг · л<sup>-1</sup>, рН = 8,2, температура 15–16 °C. Устриц ежедневно кормили микроводорослями *Tetraselmis viridis* (R. E. Norris, Hori & Chihara, 1980) в концентрации  $2 \cdot 10^8$  кл./мл (штамм IBSS-25 из коллекции отдела биотехнологии и фиторесурсов ФИЦ ИнБЮМ) и меняли воду в емкостях для удаления продуктов метаболизма.

После окончания периода акклиматизации устриц случайным образом делили на контрольную и 3 экспериментальных группы ( $n = 30$ ). Забор гемолимфы проводили из сердечного синуса с помощью стерильного шприца (1,0–2,0 мл). Пробу гемолимфы объединяли от трех особей. Гемоциты трижды отмывали от плазмы в стерильной морской воде на центрифуге Eppendorf 5430R (500 g, 5 мин, при + 10 °C), а затем ресуспендировали в стерильной морской воде (концентрация клеток  $2\text{--}4 \cdot 10^7$  кл · мл<sup>-1</sup>). Суспензии гемоцитов инкубировали с водным экстрактом ФБП в концентрации 2, 20 и 200 мкг/мл

Андреева А. Ю., Кухарева Т. А., Боровков А. Б., Подольская М. С., Ткачук А. А., Новикова Т. М. Оценка цитотоксичности водного экстракта фикобилитропинов, перспециальной кормовой добавки для гигантской устрицы *Magallana gigas* (модель *in vitro*)

(экспериментальные группы) в течение 1 или 3 ч в темноте (18–20 °С) при непрерывном мягком перемешивании в термошейкере Biosan TS-100. Клетки контрольной группы содержали в стерильной морской воде без добавления экстракта ФБП в условиях, идентичных экспериментальным. Диапазон концентраций экстракта ФБП выбран из расчета концентраций в тесте острой токсичности в отношении клеточных линий млекопитающих [15]. По окончании заданного периода инкубации проводили повторную отмывку гемоцитов от экстракта. Далее анализировали функциональные показатели клеток методами проточной цитометрии (проточный цитометр MACSQuant, Miltenyi Biotec, Германия) и флуоресцентной микроскопии (микроскоп Olympus CX43, Япония).

Идентификацию типов гемоцитов проводили на проточном цитометре после окрашивания готовой суспензии клеток гемолимфы красителем SYBR Green I (SGI). Финальная концентрация SGI в пробе 10 мкмоль л<sup>-1</sup>. Окрашенные клетки инкубировали 40 мин в темноте при 4 °С. Содержание ДНК в гемоцитах устриц анализировали на основании гистограмм распределения флуоресценции красителя в канале FL1 (зеленая область спектра).

Долю мертвых гемоцитов в суспензии оценивали путем окрашивания клеток йодистым пропидием (Propidium iodide, PI, Sigma, США) по протоколу производителя (конечная концентрация в пробе 0,1 мг·л<sup>-1</sup> в течение 30 мин в темноте при 4 °С) и анализировали флуоресценцию клеток в диапазоне FL2 проточного цитометра (оранжевая область спектра).

Для обнаружения клеток в состоянии апоптоза суспензию гемоцитов окрашивали флуоресцентным красителем аннексин (Annexin V-FITC) (конечная концентрация в пробе 0,1 мг/л) в течение 15 мин в темноте при 4 °С. Интенсивность флуоресценции гемоцитов определяли на проточном цитометре в канале FL1 проточного цитометра (зеленая область спектра).

Анализ функциональной активности гемоцитов (жизнеспособность клеток) проводился с помощью красителя диацетат флуоресцеина (fluorescein diacetate, FDA) (конечная концентрация в пробе 0,1 мг/л). Принцип анализа жизнеспособности клеток с применением маркера основан на взаимодействии молекул красителя с неспецифическими цитоплазматическими эстеразами [16]. Окрашивание гемоцитов FDA проводили в течение 15 мин в темноте при 4 °С и оценивали интенсивность флуоресценции в канале FL1 проточного цитометра (зеленая область спектра).

Повреждения ДНК в гемоцитах устриц анализировали методом комета-теста с использованием протокола, разработанного авторами работы [17]. ДНК клеток окрашивали PI и фотографировали «кометы» на флуоресцентном микроскопе. Анализ «комет» на микрофотографиях проводили с помощью программы CometScore версии 1.5. Измеряли длину хвостов «комет», на основании чего судили о степени повреждения ДНК клеток гемолимфы устриц.

Нормальность и однородность данных проверяли с использованием теста Колмогорова – Смирнова и Левена. Данные анализировались двухфакторным дисперсионным анализом (two-way ANOVA) с последующим применением критерия Даннета для анализа различий опытных групп от контроля. Результаты представлены как среднее значение ± стандартная ошибка. Результаты считались статистически значимыми, если вероятность ошибки первого рода (*p*) была меньше 0,05. Статистический анализ проводился с использованием программного обеспечения GraphPad Prism (GraphPad Software, США).

### Результаты исследования

В контрольной группе доля мертвых гемоцитов в суспензии составляла менее 2 % (1,3 ± 0,3 %). Инкубация гемоцитов с различными концентрациями экстракта ФБП в течение 1–3 ч не приводила к статистически значимым изменениям доли мертвых клеток в суспензиях (табл.).

Доля мертвых гемоцитов в суспензиях при инкубации с экстрактом ФБП, %

Percentage of dead hemocytes in suspensions during incubation with FBP extract, %

Время воздействия, ч	Опытные группы			
	Контроль ( <i>n</i> = 10)	2 мкг/мл ( <i>n</i> = 10)	20 мкг/мл ( <i>n</i> = 10)	200 мкг/мл ( <i>n</i> = 10)
1	1,3 ± 0,3	2,4 ± 0,6	4,1 ± 1,3	5,4 ± 2,4
3	1,3 ± 0,2	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,03	1,0 ± 0,1

Экстракт ФБП в целом не активировал в гемоцитах устриц процессы апоптоза, поскольку во всех опытных группах не выявлено достоверных различий в интенсивности флуоресценции клеток, окрашенных красителем Annexin V-FITC. Исключение

составляет разовое достоверное (почти в 3 раза) увеличение интенсивности флуоресценции гемоцитов при кратковременной инкубации (1 ч) клеток с экстрактом в концентрации 20 мкг/мл (*p* < 0,05, *n* = 10), (рис. 1, а).

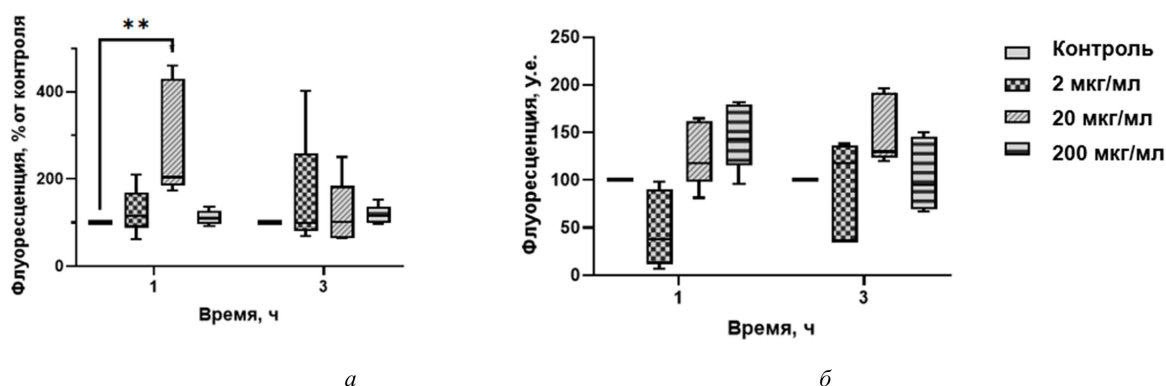


Рис. 1. Влияние экстракта фикобилипротеинов на функциональные показатели гемоцитов гигантской устрицы *M. gigas*: а – уровень апоптоза у гемоцитов; б – функциональная активность гемоцитов. Скобки и звездочки указывают на достоверные различия между группами при  $** p < 0,01$  ( $n = 10$ )

Fig. 1. Effect of phycobiliprotein extract on functional parameters of hemocytes in the Pacific oyster *M. gigas*: а – apoptosis level of hemocytes; б – functional activity of hemocytes. Brackets and asterisks indicate significant differences between groups at  $** p < 0.01$  ( $n = 10$ )

Более продолжительное воздействие экстракта на всем исследованном диапазоне концентраций не сопровождалось статистически значимым увеличением числа клеток в состоянии апоптоза в опытных пробах.

При краткосрочном (1 ч) и более длительном (3 ч) воздействии экстракта ФБП наблюдалась тенденция к росту функциональной активности гемо-

цитов с увеличением его концентрации в инкубационной среде (см. рис. 1, б). Однако эта тенденция не подтвердилась при статистическом сравнении контроля и опытных групп.

Анализ степени повреждения ДНК в гемоцитах устриц свидетельствует о достоверном генотоксическом действии исследуемого экстракта в концентрации 200 мкг/мл (рис. 2).

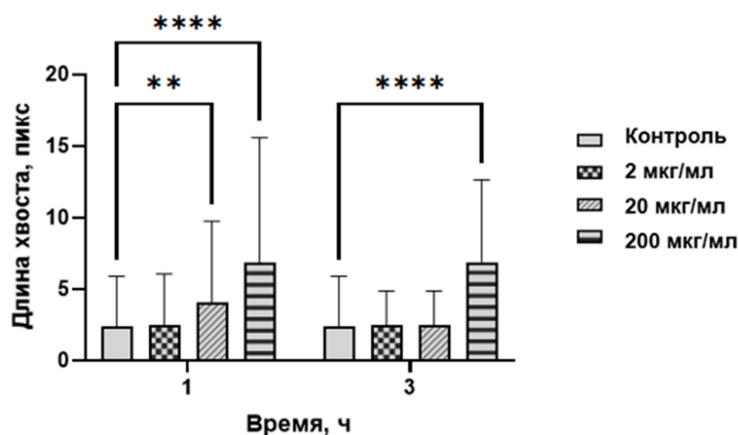


Рис. 2. Степень повреждения ДНК в гемоцитах *M. gigas* при воздействии экстракта фикобилипротеинов. Скобки и звездочки указывают на достоверные различия между группами при  $** p < 0,01$ ;  $**** p < 0,0001$  ( $n = 10$ )

Fig. 2. DNA damage level in *M. gigas* hemocytes under the influence of phycobiliprotein extract. Brackets and asterisks indicate significant differences between groups at  $** p < 0.01$ ;  $**** p < 0.0001$  ( $n = 10$ )

Достоверное увеличение длины хвоста комет выявлено спустя уже 1 ч инкубации с экстрактом 200 мкг/мл ( $p < 0,05$ ,  $n = 10$ ) и сохранялось спустя 3 ч воздействия ( $p < 0,05$ ,  $n = 10$ ). Кратковременное воздействие (1 ч) экстракта в умеренной концентрации (20 мкг/мл) также приводило к достовер-

ному росту длины хвоста комет, однако при более длительной инкубации (3 ч) не было выявлено генотоксического эффекта экстракта ФБП в концентрации 20 мкг/мл. Концентрация 2 мкг/мл не оказывала влияния на длину хвоста комет на всех временных этапах эксперимента.

### Обсуждение результатов

Несмотря на то, что вопросы замены живых микроводорослей альтернативными видами кормов с более низкой себестоимостью были рассмотрены в ряде работ [18], использование экстрактов микроводорослей в качестве кормовых добавок для гигантской устрицы в настоящий момент не применяется в аквакультуре России. В литературе описаны различные формы включения *A. platensis* в рацион промысловых видов гидробионтов: сухой порошок, цельный жидкий экстракт, наночастицы, экстракты, а также обезжиренная биомасса [19]. Согласно полученным данным экстракт ФБП обладал низкой токсичностью в отношении гемоцитов гигантской устрицы, о чем свидетельствовали низкие значения доли мертвых гемоцитов в суспензии, отсутствие признаков апоптоза клеток гемолимфы в большинстве исследованных концентраций и временных диапазонов. Кроме того, добавление экстракта ФБП не влияло на функциональную активность гемоцитов устриц.

Влияние ФБП на промысловые виды гидробионтов исследовано фрагментарно, а токсикологические исследования отсутствуют. Согласно имеющимся данным, добавление фикоцианина (150 мг/кг) в рацион гуппи (*Poecilia reticulata*) способствовало повышению скорости роста и выживаемости, усиливало активность пищеварительных ферментов, оказывало иммуномодулирующее действие [21]. Аналогично, по данным [22], фикоцианин из *A. platensis* в дозировке 150 мг/кг корма улучшал выживаемость и неспецифический иммунный ответ карпа *Cyprinus carpio* при заражении *Aeromonas hydrophila*. Включение С-ФЦ в рацион тихоокеанских белых креветок (*L. vannamei*) также способствовало достоверному увеличению темпов роста, включая такие показатели, как средняя масса тела, средний суточный прирост, удельная скорость роста и коэффициент конверсии корма ( $p < 0,05$ ) [23]. Кроме того, в данном исследовании установлено, что С-ФЦ усиливал экспрессию генов, принимающих участие в иммунном ответе (ProPO, SOD и HSP70) (Phycocyanin) [23]. Приведенные данные, очевидно, также свидетельствуют о низкой токсичности ФБП в отношении позвоночных и беспозвоночных видов гидробионтов, подтверждая результаты настоящей работы.

О нетоксичности экстракта ФБП для гигантских устриц также косвенно свидетельствует позитивный опыт применения спирулины в качестве кормовой добавки для различных промысловых видов двусторчатых моллюсков. В частности, добавление высушенной биомассы спирулины в рацион пресноводных моллюсков *Anodonta cygnea* способствовал росту содержания в них белка, в сравнении с моллюсками, получавшими стандартный рацион из живых микроводорослей. Включение высушенной биомассы спирулины в рацион корбикулы (*Corbi-*

*cula fluminea*) [24] и молоди мидий *Mytilus galloprovincialis* [25] улучшило выживаемость личинок и повысило скорость их роста соответственно. Помимо позитивного влияния на ростовые характеристики личинок промысловых видов двусторчатых моллюсков, установлено, что добавление в рацион сухой массы спирулины способствовало нормальному развитию гонад в маточном стаде гребешков (*Aequipecten irradians*). Авторы [26] показали, что у гребешков с модифицированным рационом отмечались более высокая плодовитость и скорость вылупления личинок.

Вместе с тем включение спирулины в рацион промысловых гидробионтов может иметь и негативные последствия. Так, у личинок тихоокеанского гуидака (*Panopea generosa*), получавших в качестве корма высушенную биомассу *A. platensis*, отмечалась задержка роста в сравнении с контрольной группой [27]. Показано, что высокое содержание микроводорослей в кормах может приводить к негативным последствиям у некоторых видов [28]. Так, включение спирулины в рацион тилапии *Oreochromis mossambicus* (Peters, 1852) и морского леща *Rhabdosargus sarba* (Forsskål, 1775) в количестве более 30 % от общего объема корма негативно сказывалось на их скорости роста [29]. Аналогично М. А. Олвера-Новоа с соавторами наблюдали увеличение темпов роста у тилапии *O. mossambicus* при использовании рационов с 10 и 20 % белка спирулины, однако при повышении содержания белка спирулины до 40 % и более темпы роста снижались вдвое по сравнению с контрольной группой, где использовалась рыбная мука [30]. Вместе с тем вышеуказанные исследования проводились на видах, у которых микроводоросли не являются пищевым объектом в естественной среде, в отличие от двусторчатых моллюсков, характеризующихся фильтрационным типом питания. Очевидно, что при модификации рациона большое значение имеет состав и форма добавки, ее сбалансированность, биологическая доступность, а также оптимальная концентрация действующих веществ. Согласно результатам настоящей работы, высокая концентрация экстракта ФБП (200 мкг/мл) приводила к повреждению ДНК гемоцитов устриц в условиях *in vitro* уже спустя час инкубации, которое сохранялось и в дальнейшем, что предполагает токсическое влияние на организм устриц. Концентрация 20 мкг/мл вызывала рост длины комет спустя час воздействия. Однако после более длительного воздействия экстракта в той же концентрации значение этого показателя снизилось до контрольного уровня. Следовательно, данное однократное повышение показателя повреждений ДНК можно считать случайным и не связанным с влиянием ФБП. Добавление экстракта ФБП в концентрации 2 мкг/мл не вызывало повреждений ДНК гемоцитов ни при краткосрочном (1 ч), ни при более длитель-

ном воздействии (3 ч). Следовательно, концентрации экстракта ФБП 2 и 20 мкг/мл можно считать безопасными для ДНК гемоцитов устриц.

### Заключение

Таким образом, исследование острой цитотоксичности экстракта ФБП из спирулины *A. platensis* свидетельствует о его низкой токсичности в отношении гемоцитов взрослых гигантских устриц в концентрации менее 200 мкг/мл. Показано, что

инкубация гемоцитов с экстрактом в концентрации 2–200 мкг/мл условиях *in vitro* не приводила к гибели клеток, снижению их жизнеспособности, и не вызывала активацию апоптоза. Вместе с тем высокие концентрации экстракта (200 мкг/мл) приводили к повреждениям ДНК гемоцитов даже на коротких периодах воздействия (1 и 3 ч). Концентрация ФБП в растворе для *M. gigas* должна быть менее 200 мкг/мл.

### Список источников

1. Пиркова А. В., Ладыгина Л. В., Холодов В. И. Биологические и биотехнические аспекты организации и функционирования устричного питомника на Черном море. Севастополь: ФИЦ ИнБЮМ, 2020. 120 с.
2. Lisitskaya E. V., Shchurov S. V. The first record of larval *Crassostrea gigas* (Thunberg 1793) (Bivalvia, Ostreidae) from the Black Sea // Biology Bulletin. 2024. V. 51. N. 9. P. 2688–2692.
3. Калинина М. В., Табельская А. С. Получение личинок тихоокеанской устрицы *Crassostrea gigas* заводским способом в южном Приморье // Актуальные проблемы освоения водных биологических ресурсов Российской Федерации: материалы Всерос. конф. ученых и специалистов, посвящ. 160-летию Н. М. Книповича (Мурманск, 27–28 октября 2022 г.). Мурманск: Изд-во Поляр. фил. ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии». 2023. С. 207–211.
4. Coates C. J., Belato F. A., Halanych K. M., Costa-Paiva E. M. Structure-function relationships of oxygen transport proteins in marine invertebrates enduring higher temperatures and deoxygenation // The Biological Bulletin. 2022. V. 243. N. 2. P. 134–148.
5. Gostyukhina O. L., Kladchenko E. S., Chelebieva E. S., Tkachuk A. A., Lavrichenko D. S., Andreyeva A. Y. Short-time salinity fluctuations are strong activators of oxidative stress in Mediterranean mussel (*Mytilus galloprovincialis*) // Ecologica Montenegrina. 2023. V. 63. P. 46–58.
6. Bodenstern S., Walton W. C., Steury T. D. Effect of farming practices on growth and mortality rates in triploid and diploid eastern oysters *Crassostrea virginica* // Aquaculture Environment Interactions. 2021. V. 13. P. 33–40.
7. Ushakova N. A., Pravdin V. G., Kravtsova L. Z., Ponomarev S. V., Gridina T. S., Ponomareva E. N., Rudoy D. V., Chikindas M. L. Complex bioactive supplements for aquaculture – evolutionary development of probiotic concepts // Probiotics and Antimicrobial Proteins. 2021. V. 13. N. 6. P. 1696–1708.
8. Camacho F., Macedo A., Malcata F. Potential industrial applications and commercialization of microalgae in the functional food and feed industries: A short review // Marine drugs. 2019. V. 17. N. 6. P. 312.
9. Supamattaya K., Kiriratnikom S., Boonyaratpalin M., Borowitzka L. Effect of a Dunaliella extract on growth performance, health condition, immune response and disease resistance in black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) // Aquaculture. 2005. V. 248. N. 1–4. P. 207–216.
10. Nonwachai T., Purivirojkul W., Limsuwan C., Chuchird N., Velasco M., Dhar A. K. Growth, nonspecific immune characteristics, and survival upon challenge with

- Vibrio harveyi* in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) raised on diets containing algal meal // Fish & Shellfish Immunology. 2010. V. 29. N. 2. P. 298–304.
11. Turcotte F. Effet protecteur d'un pigment (marennime) de diatomée bleue contre la bactérie pathogène *Vibrio splendidus* chez les larves de moule bleue *Mytilus edulis*: utilisation potentielle en écloseries de bivalves: master's thesis. Rimouski: Université du Québec à Rimouski, 2014. 71 p.
12. Stadnichuk I. N., Tropin I. V. Phycobiliproteins: Structure, functions and biotechnological applications // Applied Biochemistry and Microbiology. 2017. V. 53. P. 1–10.
13. Pagels F., Pereira R. N., Vicente A. A., Guedes A. C. Extraction of pigments from microalgae and cyanobacteria – A review on current methodologies // Applied Sciences. 2021. V. 11. N. 11. P. 5187.
14. Стадничук И. Н. Фикобилипротеины. М.: ВИНТИ, 1990. 192 с.
15. Soni B., Visavadiya N. P., Dalwadi N., Madamwar D., Winder C., Khalil C. Purified c-phycoerythrin: safety studies in rats and protective role against permanganate-mediated fibroblast-DNA damage // Journal of Applied Toxicology. 2010. V. 30. N. 6. P. 542–550.
16. Wang Y., Hu M., Li Q., Li J., Lin D., Lu W. Immune toxicity of TiO<sub>2</sub> under hypoxia in the green-lipped mussel *Perna viridis* based on flow cytometric analysis of hemocyte parameters // Science of the total environment. 2014. V. 470. P. 791–799.
17. Møller P., Azqueta A., Boutet-Robinet E., Koppen G., Bonassi S., Milić M., Gajski G., Costa S., Teixeira J. P., Costa Pereira C., Dusinska M., Godschalk R., Brunborg G., Gutzkow K. B., Giovannelli L., Cooke M. S., Richling E., Laffon B., Valdiglesias V., Basaran N., Del Bo' C., Zegura B., Novak M., Stopper H., Vodicka P., Vodenkova S., de Andrade V. M., Sramkova M., Gabelova A., Collins A., Langie S. A. S. Minimum Information for Reporting on the Comet Assay (MIRCA): recommendations for describing comet assay procedures and results // Nature protocols. 2020. V. 15. N. 12. P. 3817–3826.
18. Yusoff F. M., Wong N. L. W. S. Microalgae as feeds for bivalves // Handbook of Food and Feed from Microalgae. Academic Press, 2023. P. 451–470.
19. Ashour M., Mabrouk M. M., Mansour A. I., Abdelhamid A. F., Kader M. F. A., Elokaby M. A., El-Nawwany M. M., Abdelwarith A. A., Younis E. M., Davies S. J., El-Haroun E., Naiel M. A. Impact of dietary administration of *Arthrospira platensis* free-lipid biomass on growth performance, body composition, redox status, immune responses, and some related genes of pacific whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei* // Plos one. 2024. V. 19. N. 6. P. e0300748.

Andreyeva A. Yu., Kukhareva T. A., Vopovkov A. V., Rodolskaya M. S., Tkachuk A. A., Novikova T. M. Assessment of the cytotoxicity of an aqueous extract of phycobiliproteins, a promising feed additive for the giant oyster *Magallana gigas* (*in vitro* model)

20. Yusoff F. M., Banerjee S., Nagao N., Imaizumi Y., Shariff M., Toda T. Use of microalgae pigments in aquaculture // Pigments from microalgae handbook. 2020. P. 471–513.

21. Biabani Asrami M., Sudagar M., Shahraki N., Vahdat S. Effect of extracted phycocyanin from *Spirulina platensis* on growth parameters, colorations, digestive enzymes and body chemical compositions of Guppy fish (*Poecilia reticulata*) // Journal of Survey in Fisheries Sciences. 2019. V. 6. N. 1. P. 21–34.

22. Muchtar M., Sukenda S., Nuryati S., Hidayatullah D. The use of immunostimulant from phycocyanin of *Spirulina platensis* to control motile aeromonad septicaemia (MAS) disease in common carp *Cyprinus carpio* // Jurnal Akuakultur Indonesia. 2019. V. 18. N. 1. P. 101–109.

23. Kizhakkemkarammal Puthiyedathu S., Angel J. R. J., Thirugnanamurthy S., Suresh S., Nathamuni S., Raja R. A., Kumar S., Tomy S., Dayal J. S., Paran B. C., Sawant P. B., Shashi B. C., Kumar C. N., Kondusamy A. Effect of dietary C-Phycocyanin on growth, survival, haematology, immune response, gut microbiome and disease resistance of Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei* // Aquaculture Research. 2022. V. 53. N. 17. P. 6292–6309.

24. Ramli M. Z., Ibrahim A., Yusoff A., Rak A. E., Wei L. S. Effects of feeding treatments on growth and survival of Asian clam (*Corbicula fluminea*) in the hatchery //

Journal Of Agrobiotechnology. 2021. V. 12. N. 1. P. 58–65.

25. Langdon C., Ónal E. Replacement of living microalgae with spray-dried diets for the marine mussel *Mytilus galloprovincialis* // Aquaculture. 1999. V. 180. N. 3-4. P. 283–294.

26. Zhou B., Liu W., Qu W., Tseng C. K. Application of Spirulina mixed feed in the breeding of bay scallop // Biore-source technology. 1991. V. 38. N. 2-3. P. 229–232.

27. Arney B., Liu W., Forster I. P., McKinley R. S., Pearce C. M. Feasibility of dietary substitution of live microalgae with spray-dried *Schizochytrium sp.* or Spirulina in the hatchery culture of juveniles of the Pacific geoduck clam (*Panopea generosa*) // Aquaculture. 2015. V. 444. P. 117–133.

28. Shah M. R., Lutz G. A., Alam A., Sarker P., Kabir Chowdhury M. A., Parsaemehr A., Liang Y., Daroch M. Microalgae in aquafeeds for a sustainable aquaculture industry // Journal of applied phycology. 2018. V. 30. P. 197–213.

29. Sharma S. M., Panta K. Use of Spirulina cultured in industrial effluents as a feed supplement on *Sarotherodon mossambicus* // Sonsik Journal. 2012. V. 4. P. 39–44.

30. Olvera-Novoa M. A., Domínguez-Cen L. J., Olivera-Castillo L., Martínez-Palacios C. A. Effect of the use of the microalga *Spirulina maxima* as fish meal replacement in diets for tilapia, *Oreochromis mossambicus* (Peters), fry // Aquaculture research. 1998. V. 29. N. 10. P. 709–715.

## References

1. Pirkova A. V., Ladygina L. V., Holodov V. I. *Biologicheskie i biotekhnicheskie aspekty organizacii i funkcionirovaniya ustrichnogo pitomnika na Chyornom more* [Biological and biotechnical aspects of the organization and functioning of an oyster nursery on the Black Sea]. Sevastopol, FIC InBYUM, 2020. 120 p.
2. Lisitskaya E. V., Shchurov S. V. The first record of larval *Crassostrea gigas* (Thunberg 1793) (Bivalvia, Ostreidae) from the Black Sea. *Biology Bulletin*, 2024, vol. 51, no. 9, pp. 2688–2692.
3. Kalinina M. V., Tabel'skaya A. S. Poluchenie lichinok tihookeanskoj ustricy *Crassostrea gigas* zavodskim sposobom v yuzhnom Primor'e [Obtaining larvae of the giant oyster *Crassostrea gigas* by the factory method in southern Primorye]. *Aktual'nye problemy osvoeniya vodnyh biologicheskikh resursov Rossijskoj Federacii: materialy Vserossijskoj konferencii uchenyh i specialistov, posvyashchennoj 160-letiyu N. M. Knipovicha (Murmansk, 27–28 oktyabrya 2022 g.)*. Murmansk, Izd-vo Polyar. fil. FGBNU «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut rybnogo hozyajstva i okeanografii», 2023. Pp. 207–211.
4. Coates C. J., Belato F. A., Halanych K. M., Costa-Paiva E. M. Structure-function relationships of oxygen transport proteins in marine invertebrates enduring higher temperatures and deoxygenation. *The Biological Bulletin*, 2022, vol. 243, no. 2, pp. 134–148.
5. Gostyukhina O. L., Kladchenko E. S., Chelebieva E. S., Tkachuk A. A., Lavrichenko D. S., Andreyeva A. Y. Short-time salinity fluctuations are strong activators of oxidative stress in Mediterranean mussel (*Mytilus galloprovincialis*). *Ecologica Montenegrina*, 2023, vol. 63, pp. 46–58.
6. Bodenstein S., Walton W. C., Steury T. D. Effect of farming practices on growth and mortality rates in triploid and diploid eastern oysters *Crassostrea virginica*. *Aquaculture Environment Interactions*, 2021, vol. 13, pp. 33–40.
7. Ushakova N. A., Pravdin V. G., Kravtsova L. Z., Ponomarev S. V., Gridina T. S., Ponomareva E. N., Rudoy D. V., Chikindas M. L. Complex bioactive supplements for aquaculture – evolutionary development of probiotic concepts. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 2021, vol. 13, no. 6, pp. 1696–1708.
8. Camacho F., Macedo A., Malcata F. Potential industrial applications and commercialization of microalgae in the functional food and feed industries: A short review. *Marine drugs*, 2019, vol. 17, no. 6, p. 312.
9. Supamattaya K., Kiriratnikom S., Boonyaratpalin M., Borowitzka L. Effect of a Dunaliella extract on growth performance, health condition, immune response and disease resistance in black tiger shrimp (*Penaeus monodon*). *Aquaculture*, 2005, vol. 248, no. 1–4, pp. 207–216.
10. Nonwachai T., Purivirojkul W., Limsuwan C., Chuchird N., Velasco M., Dhar A. K. Growth, nonspecific immune characteristics, and survival upon challenge with *Vibrio harveyi* in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) raised on diets containing algal meal. *Fish & Shellfish Immunology*, 2010, vol. 29, no. 2, pp. 298–304.
11. Turcotte F. *Effet protecteur d'un pigment (marennime) de diatomée bleue contre la bactérie pathogène Vibrio splendidus chez les larves de moule bleue Mytilus edulis: utilisation potentielle en écloseries de bivalves: master's thesis*. Rimouski, Université du Québec à Rimouski, 2014. 71 p.
12. Stadnichuk I. N., Tropin I. V. Phycobiliproteins: Structure, functions and biotechnological applications. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2017, vol. 53, pp. 1–10.
13. Pagels F., Pereira R. N., Vicente A. A., Guedes A. C. Extraction of pigments from microalgae and cyanobacteria – A review on current methodologies. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 11, p. 5187.
14. Stadnichuk I. N. *Fikobiliproteiny* [Phycobiliproteins]. Moscow, VINITI, 1990. 192 p.

15. Soni B., Visavadiya N. P., Dalwadi N., Madamwar D., Winder C., Khalil C. Purified c-phycoerythrin: safety studies in rats and protective role against permanganate-mediated fibroblast-DNA damage. *Journal of Applied Toxicology*, 2010, vol. 30, no. 6, pp. 542-550.
16. Wang Y., Hu M., Li Q., Li J., Lin D., Lu W. Immune toxicity of TiO<sub>2</sub> under hypoxia in the green-lipped mussel *Perna viridis* based on flow cytometric analysis of hemocyte parameters. *Science of the total environment*, 2014, vol. 470, pp. 791-799.
17. Møller P., Azqueta A., Boutet-Robinet E., Koppen G., Bonassi S., Milić M., Gajski G., Costa S., Teixeira J. P., Costa Pereira C., Dusinska M., Godschalk R., Brunborg G., Gutzkow K. B., Giovannelli L., Cooke M. S., Richling E., Laffon B., Valdiguiesias V., Basaran N., Del Bo' C., Zegura B., Novak M., Stopper H., Vodicka P., Vodenkova S., de Andrade V. M., Sramkova M., Gabelova A., Collins A., Langie S. A. S. Minimum Information for Reporting on the Comet Assay (MIRCA): recommendations for describing comet assay procedures and results. *Nature protocols*, 2020, vol. 15, no. 12, pp. 3817-3826.
18. Yusoff F. M., Wong N. L. W. S. *Microalgae as feeds for bivalves. Handbook of Food and Feed from Microalgae*. Academic Press, 2023. Pp. 451-470.
19. Ashour M., Mabrouk M. M., Mansour A. I., Abdelhamid A. F., Kader M. F. A., Elokaby M. A., El-Nawwany M. M., Abdelwarith A. A., Younis E. M., Davies S. J., El-Haroun E., Naiel M. A. Impact of dietary administration of *Arthrospira platensis* free-lipid biomass on growth performance, body composition, redox status, immune responses, and some related genes of pacific whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Plos one*, 2024, vol. 19, no. 6, p. e0300748.
20. Yusoff F. M., Banerjee S., Nagao N., Imaizumi Y., Shariff M., Toda T. Use of microalgae pigments in aquaculture. *Pigments from microalgae handbook*, 2020, pp. 471-513.
21. Biabani Asrami M., Sudagar M., Shahraki N., Vahdat S. Effect of extracted phycocyanin from *Spirulina platensis* growth parameters, colorations, digestive enzymes and body chemical compositions of Guppy fish (*Poecilia reticulata*). *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 21-34.
22. Muchtar M., Sukenda S., Nuryati S., Hidayatullah D. The use of immunostimulant from phycocyanin of *Spirulina platensis* to control motile aeromonad septicemia (MAS) disease in common carp *Cyprinus carpio*. *Jurnal Akuakultur Indonesia*, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 101-109.
23. Kizhakkemammal Puthiyedathu S., Angel J. R. J., Thirugnanamurthy S., Suresh S., Nathamuni S., Raja R. A., Kumar S., Tomy S., Dayal J. S., Paran B. C., Sawant P. B., Shashi B. C., Kumar C. N., Kondusamy A. Effect of dietary C-Phycocyanin on growth, survival, haematology, immune response, gut microbiome and disease resistance of Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*. *Aquaculture Research*, 2022, vol. 53, no. 17, pp. 6292-6309.
24. Ramli M. Z., Ibrahim A., Yusoff A., Rak A. E., Wei L. S. Effects of feeding treatments on growth and survival of Asian clam (*Corbicula fluminea*) in the hatchery. *Journal Of Agrobiotechnology*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 58-65.
25. Langdon C., Önal E. Replacement of living microalgae with spray-dried diets for the marine mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Aquaculture*, 1999, vol. 180, no. 3-4, pp. 283-294.
26. Zhou B., Liu W., Qu W., Tseng C. K. Application of Spirulina mixed feed in the breeding of bay scallop. *Biore-source technology*, 1991, vol. 38, no. 2-3, pp. 229-232.
27. Arney B., Liu W., Forster I. P., McKinley R. S., Pearce C. M. Feasibility of dietary substitution of live microalgae with spray-dried *Schizochytrium sp.* or Spirulina in the hatchery culture of juveniles of the Pacific geoduck clam (*Panopea generosa*). *Aquaculture*, 2015, vol. 444, pp. 117-133.
28. Shah M. R., Lutz G. A., Alam A., Sarker P., Kabir Chowdhury M. A., Parsaeimehr A., Liang Y., Daroch M. Microalgae in aquafeeds for a sustainable aquaculture industry. *Journal of applied phycology*, 2018, vol. 30, pp. 197-213.
29. Sharma S. M., Panta K. Use of Spirulina cultured in industrial effluents as a feed supplement on *Sarotherodon mossambicus*. *Sonsik Journal*, 2012, vol. 4, pp. 39-44.
30. Olvera-Novoa M. A., Dominguez-Cen L. J., Olivera-Castillo L., Martínez-Palacios C. A. Effect of the use of the microalga *Spirulina maxima* as fish meal replacement in diets for tilapia, *Oreochromis mossambicus* (Peters), fry. *Aquaculture research*, 1998, vol. 29, no. 10, pp. 709-715.

Статья поступила в редакцию 14.07.2025; одобрена после рецензирования 12.08.2025; принята к публикации 12.05.2026  
The article was submitted 14.07.2025; approved after reviewing 12.08.2025; accepted for publication 12.05.2026

### Информация об авторах / Information about the authors

**Александра Юрьевна Андреева** – кандидат биологических наук; ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории экологической иммунологии гидробионтов; Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН; lab\_eimg@ibss-ras.ru

**Alexandra Yu. Andreeva** – Candidate of Biological Sciences; Leading Researcher, Head of the Laboratory of Ecological Immunology of Aquatic Organisms; A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS; lab\_eimg@ibss-ras.ru

**Татьяна Александровна Кухарева** – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории экологической иммунологии гидробионтов; Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН; kukhareva@ibss-ras.ru

**Tatiana A. Kukhareva** – Candidate of Biological Sciences; Senior Researcher of the Laboratory of Ecological Immunology of Aquatic Organisms; A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS; kukhareva@ibss-ras.ru

**Андрей Борисович Боровков** – кандидат биологических наук; ведущий научный сотрудник, заведующий отделом биотехнологии и фиторесурсов; Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН; biotex@ibss-ras.ru

**Мария Сергеевна Подольская** – младший научный сотрудник лаборатории экологической иммунологии гидробионтов; Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН; podolskayams@ibss-ras.ru

**Анастасия Александровна Ткачук** – младший научный сотрудник лаборатории экологической иммунологии гидробионтов; Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН; tkachuk@ibss-ras.ru

**Татьяна Михайловна Новикова** – младший научный сотрудник отдела биотехнологии и фиторесурсов; Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН; novikovat.m@ibss-ras.ru

**Andrey B. Borovkov** – Candidate of Biological Sciences; Leading Researcher, Head of the Department of Biotechnology and Phytoresources; A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS; biotex@ibss-ras.ru

**Mariya S. Podolskaya** – Junior Researcher of the Laboratory of Ecological Immunology of Aquatic Organisms; A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS; podolskayams@ibss-ras.ru

**Anastasia A. Tkachuk** – Junior Researcher of the Laboratory of Ecological Immunology of Aquatic Organisms; A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS; tkachuk@ibss-ras.ru

**Tatiana M. Novikova** – Junior Researcher of the Department of Biotechnology and Phytoresources; A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS; novikovat.m@ibss-ras.ru

