

Научная статья

УДК 571.24

doi: 10.17223/19988591/64/10

Оценка кратковременного влияния наночастиц подводной сварки на двухстворчатого моллюска *Arca boucardi*

Константин Юрьевич Кириченко¹, Константин Сергеевич Пикула²,
Владимир Викторович Чайка³, Анна Алимовна Анисимова⁴,
Владимир Александрович Черноусов⁵, Сергей Георгиевич Паршин⁶,
Александр Иванович Агошков⁷, Александр Валентинович Гридасов⁸,
Юлия Сергеевна Паршина⁹, Антон Васильевич Погодаев¹⁰,
Кирилл Сергеевич Голохваст¹¹

^{1, 3, 5, 11} Сибирский федеральный исследовательский центр агrobiотехнологий Российской академии наук, Краснообск, Россия

^{2, 4, 7, 8, 10} Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

^{6, 9} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

¹¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ kirichenko@sfscs.ru

² pikula_ks@dvfu.ru

³ chayka@sfscs.ru

⁴ anisimova.aa@dvfu.ru

⁵ chernousov@sfscs.ru

⁶ parshin@spbstu.ru

⁷ agoshkov.ai@dvfu.ru

⁸ gridasov.av@dvfu.ru

⁹ st068842@student.spbu.ru

¹⁰ pogodaev.av@dvfu.ru

¹¹ golokhvast@sfscs.ru

Аннотация. При стыковке подводных газопроводов и подводном строительстве широко используется подводная сварка. В состав многих порошковых проволок для подводной сварки и резки входят вредные и опасные соединения, которые могут оказывать негативное воздействие на морскую флору и фауну. Данная работа посвящена первой попытке определить уровень негативного воздействия частиц подводной сварки на морского моллюска *Arca boucardi*, обитающего в Японском море, при кратковременном культивировании.

Ключевые слова: токсичность для водных организмов, морской еж, подводная сварка

Источник финансирования: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-24-01169.

Благодарности: Авторы благодарны сотрудникам ЦКП ДВФУ и ЦКП ДВГИ за предоставленное научное оборудование и выражают признательность специалистам СибНХБ – филиала ФГБУН ГПНТБ за помощь при работе с литературой.

Для цитирования: Кириченко К.Ю., Пикула К.С., Чайка В.В., Анисимова А.А., Черноусов В.А., Паршин С.Г., Агошков А.И., Гридасов А.В., Паршина Ю.С., Погодаев А.В., Голохваст К.С. Оценка кратковременного влияния наночастиц подводной сварки на двухстворчатого моллюска *Arca boucardi* // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2023. № 64. С. 191–204. doi: 10.17223/19988591/64/10

Original article

doi: 10.17223/19988591/64/10

Evaluation of the short-term effect of underwater welding nanoparticles on the *Arca boucardi* bivalve mollusk

Konstantin Yu. Kirichenko¹, Konstantin S. Pikula², Vladimir V. Chaika³, Anna A. Anisimova⁴, Vladimir A. Chernousov⁵, Sergey G. Parshin⁶, Alexander I. Agoshkov⁷, Alexander V. Gridasov⁸, Yulia S. Parshina⁹, Anton V. Pogodaev¹⁰, Kirill S. Golokhvast¹¹

^{1, 3, 5, 11} Siberian Federal Research Center for Agrobiotechnologies,
Russian Academy of Sciences, r.p. Krasnoobsk, Russian Federation

^{2, 4, 7, 8, 10} Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

^{6, 9} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

¹¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ kirichenko@sfsca.ru

² pikula_ks@dvfu.ru

³ chayka@sfsca.ru

⁴ anisimova.aa@dvfu.ru

⁵ chernousov@sfsca.ru

⁶ parshin@spbstu.ru

⁷ agoshkov.ai@dvfu.ru

⁸ gridasov.av@dvfu.ru

⁹ st068842@student.spbu.ru

¹⁰ pogodaev.av@dvfu.ru

¹¹ golokhvast@sfsca.ru

Summary. Underwater welding is widely used in the docking of underwater gas pipelines and underwater construction. Many powder wires for underwater welding and cutting include harmful and dangerous compounds that can have a negative impact on marine flora and fauna. This work is devoted to the first attempt to determine the level of negative impact of underwater welding particles on the *Arca boucardi* marine mollusk living in the Sea of Japan during short-term cultivation.

The article contains 4 Figures, 4 Tables and 13 References.

Keywords: aquatic toxicity, sea urchin, underwater welding

Fundings: The work was carried out with the financial support of the RGNF within the framework of scientific project No. 22-24-01169.

Благодарности: The authors are grateful to the staff of the FEFU Center for Shared Use and the DVGI Center for Shared Use for the provided scientific equipment and express their gratitude to the specialists of the SibNSKhB, a branch of the Federal State Budgetary Institution of Scientific Research, State Public Library for Science and Technology, for their assistance in working with the literature.

For citation: Kirichenko KY, Pikula KS, Chaika VV, Anisimova AA, Chernousov VA, Parshin SG, Agoshkov AI, Gridasov AV, Parshina YS, Pogodaev AV, Golokhvast KS. Evaluation of the short-term effect of underwater welding nanoparticles on the *Arca boucardi* bivalve mollusk. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2023;64:191-204. doi: 10.17223/19988591/64/10

Введение

Динамичный рост численности населения в мире с сопутствующим развитием инфраструктуры городов и промышленных предприятий подталкивает к активному освоению континентального шельфа, в частности добыче нефтепродуктов с морского дна и созданию трубопроводных сетей для их транспортировки [1, 2]. В настоящее время мировая добыча нефти достигла 3 150 млн т, из которых 30% получено со дна Мирового океана [3]. Для выполнения работ по прокладке подводных трубопроводов, строительства прибрежных объектов инфраструктуры ввиду экономической целесообразности с каждым годом все шире используются различные методы подводной сварки и резки металлов, которые являются альтернативой строительства «сухих» доков и дорогостоящих технологических операций по подъему на сушу различных крупногабаритных металлических конструкций. Неотъемлемым атрибутом подводной сварки является формирование твердых частиц, которые попадают в водную среду. Производные компоненты подводной сварки представлены первичными микро- и наночастицами, которые в дальнейшем способны формировать более крупные агрегаты. Наночастицы вызывают обширный интерес в современном научном сообществе и изучаются учеными многих стран мира [4].

В связи с этим очевиден растущий спрос на исследование негативного воздействия твердых частиц подводной сварки на морские экосистемы [5]. Необходимо тщательно и всесторонне изучить характеристики твердых частиц, образующихся при подводной сварке, чтобы можно было своевременно проанализировать их антропогенную нагрузку на морские экосистемы [6] и производить корректную оценку рисков загрязнения морской среды. В последние десятилетия загрязнение окружающей среды стало основной проблемой во всем мире, что вызывает фундаментальную озабоченность экологов, биологов-экологов, экологов и исследователей из других научных областей. Растворение выбрасываемых веществ является основной причиной загрязнения окружающей среды во всех ключевых сферах, включая гидросферу, литосферу и биосферу, среди прочих. Особую озабоченность вызывает широкое распространение различных загрязняющих веществ, включая токсичные соединения тяжелых металлов и других химически опасных веществ [7]. Потенциальные различия в восприимчивости живых организмов к загрязняющим веществам в виде наночастиц делают использование стратегий тестирования на токсичность для различных сообществ полезным для понимания уровня риска наночастиц для водной среды [8].

Данная работа посвящена оценке токсикологического воздействия твердых нано- и микроразмерных частиц подводной сварки на моллюсках *Arca boucardi* [9].

Материалы и методы

Частицы, использованные в эксперименте, были получены в результате сварки и резки металлов в морской воде. Сварка и резка металлов проводились в резервуаре с морской водой объемом 140 л. Пробы были отобраны по истечении 60 с, что соответствует времени сжигания 1 электрода для подводной сварки из экспериментального резервуара. Для этого были использованы пластиковые пробирки ёмкостью 50 мл, вода отбиралась из среднего слоя. Далее емкости маркировались и были доставлены в лабораторию для проведения дальнейших исследований.

Таблица 1 [Table 1]

Образцы сварочных суспензий [Samples of welding suspensions]

Кодовое обозначение [Code designation]	Расшифровка [Description]	Описание [Description]
WE	Welding Electrode	Ручная электродуговая сварка с применением электродов Arcair size 5/32X14(3,97 x 356 мм) cat.no.:42-984-004. Была отобрана проба после 60 с сварки [Manual arc welding using Arcair electrodes size 5/32X14(3.97 x 356 mm) cat.no.:42-984-004. A sample was taken after 60 seconds of welding]
WW	Welding Wire	Сварка проволокой ППС-АПЛ2 (1,6 мм) пластины стали марки 20 размерами 300x100x80 мм способом прямой полярности с силой тока 180 А и напряжением 32 В. Угол сварки 90±15°, скорость 20 мм в минуту. Была отобрана проба после 60 с сварки [Welding with a PPS-APL 2 (1.6 mm) wire of a steel plate of grade 20, with dimensions of 300x100x80 mm, using a direct polarity method with a current of 180 amperes and a voltage of 32 volts. The welding angle is 90±15°, the speed is 20 mm per minute. A sample was taken after 60 seconds of welding]
CE	Cutting Electrode	Ручная резка с применением электродов Arcair size 5/16X14(8,0 x 356 мм) cat.no.:42-059-007. Была отобрана проба через 60 с после начала сварки [Manual cutting using Arcair electrodes size 5/16X14(8.0 x 356 mm) cat.no.: 42-059-007. A sample was taken 60 seconds after the start of welding]
CW	Cutting Wire	Резка проволокой ППР-АПЛ1 (2.0) пластины стали марки 20 размерами 300x100x80 мм способом прямой полярности с силой тока 280–300 А и напряжением 37 В. Угол сварки 90±15°, скорость 0,18–0,20 м в минуту. Было отобрано две пробы через 60 с от начала резки [Wire cutting of PPR-P1 (2.0) steel plates of grade 20 with dimensions of 300x100x80 mm, using a direct polarity method with a current of 280-300 amperes and a voltage of 37 volts. The welding angle is 90± 15°, the speed is 0.18-0.20 m per minute. Two samples were taken, 60 seconds after the start of cutting]

Всего в эксперименте было взято 45 моллюсков *A. boucardi*, выловленных на глубине 3 м в бухте Парис, о. Русский, залив Петра Великого, Японское море. Отбирались моллюски размерами: длиной $5 \pm 0,5$ см; высотой $2,5 \pm 0,2$ см. Моллюски акклиматизировались в течение недели в аквариуме объёмом 200 л с аэрацией при температуре 10 ± 2 °С. После акклиматизации моллюски были разделены на 8 экспериментальных групп и группу «контроль» ($n=5$ в каждой группе):

1-я экспериментальная группа WE-1 с добавлением частиц и образованием концентрации 1%;

2-я экспериментальная группа WE-10 с добавлением частиц и образованием концентрации 10%;

3-я экспериментальная группа WW-1 с добавлением частиц и образованием концентрации 1%;

4-я экспериментальная группа WW-10 с добавлением частиц и образованием концентрации 10%;

5-я экспериментальная группа CE-1 с добавлением частиц и образованием концентрации 1%;

6-я экспериментальная группа CE-10 с добавлением частиц и образованием концентрации 10%;

7-я экспериментальная группа CW-1 с добавлением частиц и образованием концентрации 1%;

8-я экспериментальная группа CW-10 с добавлением частиц и образованием концентрации 10%.

Контрольную группу поместили в морскую воду, набранную в бухте Парис, о. Русский, залив Петра Великого.

Каждая экспериментальная группа была помещена в аквариум объёмом 10 л с аэрацией с добавлением морской воды, содержащий нано- и микрочастицы, образованные при подводной сварке и резке металлов.

Проточная цитометрия

Проточный цитометр CytoFLEX (Beckman Coulter, США) с программным пакетом CytExpert v.2.5 использовали для регистрации гемоцитов моллюска *A. boucardi* и оценки мембранного потенциала клеток.

Для анализа проточной цитометрии образцы гемолимфы отбирались из заднего аддуктора в 0,3 М раствор искусственной морской воды, не содержащий кальция и магния (CMFSS), pH 7,7. Образцы гемолимфы отбирали в раствор CMFSS (предварительно набранный в шприц) при соотношении объёмов 700 мкл гемолимфы на 300 мкл CMFSS. После отбора гемолимфы она дважды отмывалась CMFSS путем центрифугирования (5 мин при 800 g). Между процедурами образцы находились на льду. После этого образцы гемолимфы окрашивались.

Измерения проводились после 48 ч экспозиции моллюсков со сварочными суспензиями. Все измерения проводились в пяти повторностях. Для каждой повторности использовался биологический материал разных

животных. В каждой повторности измерение проводилось со скоростью 100 мкл/мин до накопления 10 000 зарегистрированных событий, идентифицированных как живые клетки гемоцитов.

Мертвые клетки гемоцитов исключали из выборки при регистрации позитивной реакции на окрашивание йодидом пропидия (PI). Мембранный потенциал клеток оценивали с помощью липофильного положительно заряженного флуоресцентного красителя 3,3'-дигексилоксакарбонианин йодида (DiOC₆), который способен связываться с мембранами и другими гидрофобными отрицательно заряженными клеточными структурами. Если потенциал мембраны клетки уменьшается и клетки становятся более электроотрицательными по сравнению с контролем, тогда будет поглощено больше красителя, что указывает на гиперполяризацию. Если мембранный потенциал увеличивается и клетка становится менее электроотрицательной по сравнению с контрольной группой, краситель будет удален из клетки и, таким образом, укажет на деполяризацию. Данная методика нашла широкое применение в исследованиях по оценке токсичности [10, 11].

Использованные флуоресцентные красители и параметры их регистрации представлены в табл. 2. Во всех случаях источником возбуждения служил синий лазер (488 нм) проточного цитометра CytoFLEX. Источник возбуждения и каналы эмиссии выбирались в соответствии с максимальной эмиссией используемых флуоресцентных красителей, предоставленной производителем (Molecular Probes, США). Оптимизация используемых концентраций красителей и продолжительности окрашивания была проведена ранее.

Таблица 2 [Table 2]

Условия оценки цитологических параметров
[Conditions for evaluation of cytological parameters]

Оцениваемый параметр [Estimated parameter]	Флуоресцентный краситель [Fluorescent dye]	Концентрация красителя [Dye concentration]	Длительность окрашивания [Duration of staining]	Канал эмиссии проточного цитометра [The emission channel of the flow cytometer]
Жизнеспособность клеток [Cell viability]	PI	15 мкМ	20 мин	610
Мембранный потенциал [Membrane potential]	DiOC ₆	1 мкМ	15 мин	525

PI, Propidium iodide; DiOC₆, 3,3'-dihexyloxacarbocyanine iodide.

Статистическая обработка. Статистическая обработка выполнена в программном комплексе GraphPad Prism 8.0.2 (GraphPad Software, США). Статистическая достоверность определена с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с применением множественного сравнительного теста Даннета. Значение $p \leq 0,05$ рассматривалось как статистически достоверное.

Гистология

Для гистологического исследования забирались следующие ткани и внутренние органы: жабры, пищеварительная железа.

Для гистологического исследования образцы органов фиксировали в 10% нейтральном забуференном растворе формалина. Гистологическая обработка тканей проводилась по стандартной методике в спирте с восходящим градиентом концентрации. После обезвоживания ткани внутренних органов заливались в парафиновые блоки. Срезы (толщиной 3 мкм) готовились на санном микротоме MC-1 (Диаэм, Россия). Срезы окрашивались обзорными красителями гематоксилин-эозином. Морфологический анализ микроскопических препаратов проводили с помощью системы Axio Imager Z2 для фотосъемки – Axio Cam 3 и программы компьютерной морфометрии Axio Vision 4.2 (Carl Zeiss, Германия) [12].

Гистопатологические изменения в органах фиксировались визуально. Морфометрический анализ включал измерение длины, ширины и площади клеток и их ядер. Статистический анализ включал определение средних значений исследуемых параметров и их стандартных ошибок и достоверности различий на уровне значимости $p < 0,05$ с использованием критерия Стьюдента.

Результаты исследования и обсуждения

Проточная цитометрия

Рисунок 1 показывает, что при сравнении средней интенсивности флуоресценции красителя DiOC₆, связавшегося с мембранами гемоцитов, наиболее выраженную деполяризацию вызвало воздействие образца WE, полученного методом ручной электродуговой сварки с применением электродов Arcair size 5/32X14.

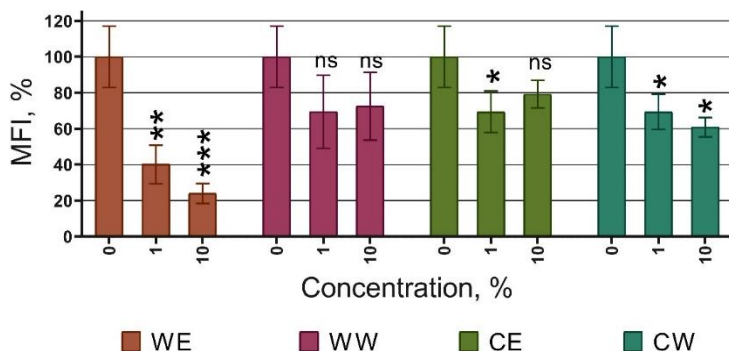


Рис. 1. Общее изменение поляризации мембран гемоцитов *A. boucardi* после 48 ч воздействия сварочных суспензий
 [Fig. 1. General change in polarization of *A. boucardi* hemocyte membranes after 48 hours of exposure to welding suspensions]

Образец WW, полученный при использовании сварки проволокой ППС-АПЛ2, при воздействии на моллюсков *A. boucardi* в концентрации 1 и 10% от исходной суспензии не вызвал значительного снижения средней интенсивности флуоресценции красителя DiOC₆ в сравнении с контролем.

Образец CW, полученный методом ручной резки с применением электродов Argair size 5/16X14, вызвал дозозависимое уменьшение средней интенсивности флуоресценции красителя DiOC₆.

Образец CE вызвал снижение поляризации мембран гемоцитов только при наименьшей использованной концентрации (1%) и не имел статистически достоверного воздействия на мембранный потенциал клеток при концентрации 10%.

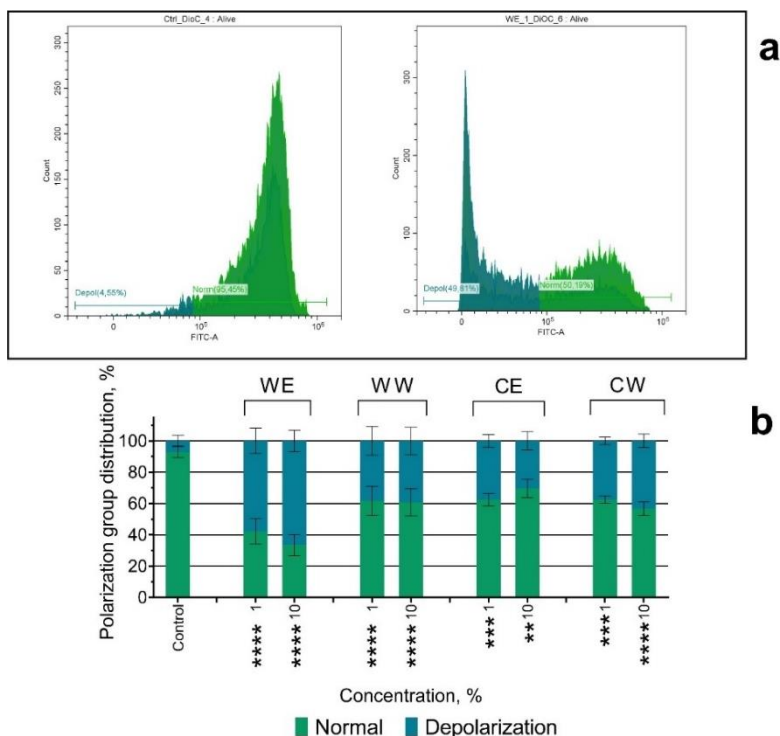


Рис. 2. Изменение соотношения клеток гемоцитов *A. boucardi* с нормальной и сниженной поляризацией мембран после 48 часов воздействия сварочных суспензий: *a* – уровень поляризации гемоцитов контрольной (слева) и экспериментальной (справа) групп (зеленым показана нормальная поляризация, синим – клетки со сниженной поляризацией мембран); *b* – соотношение доли клеток с нормальной и сниженной поляризацией
* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$

[Fig. 2. Change in the ratio of *A. boucardi* hemocyte cells with normal and reduced membrane polarization after 48 hours of exposure to welding suspensions: *a* – the level of polarization of hemocytes of the control (left) and experimental (right) groups (green shows normal polarization, blue – cells with reduced membrane polarization); *b* – the ratio of the proportion of cells with normal and reduced polarization
* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; **** $p < 0.0001$]

Рисунок 2 показывает наивысшую долю клеток со сниженной поляризацией мембран гемоцитов *A. boucardi* при воздействии образца WE, что соответствует данным рис. 1. Однако метод сравнения, показанный на рис. 2,

выявил, что все образцы снижали поляризацию мембран у некоторой части гемоцитов. При этом величины данного снижения между концентрациями 1 и 10% практически не отличались внутри каждого образца.

По уровню снижения поляризации мембран гемоцитов *A. boucardi* исследованные образцы можно расположить в следующем порядке (от наибольшего воздействия к наименьшему): WE > CW > WW > CE.

Гистология

При визуальном изучении окрашенных гистологических срезов во всех экспериментальных группах нами не было обнаружено достоверных признаков патологических изменений исследуемых внутренних органов. Ткань жабр моллюска *A. boucardi* во всех исследуемых группах имеет нормальное гистологическое строение (рис. 3).

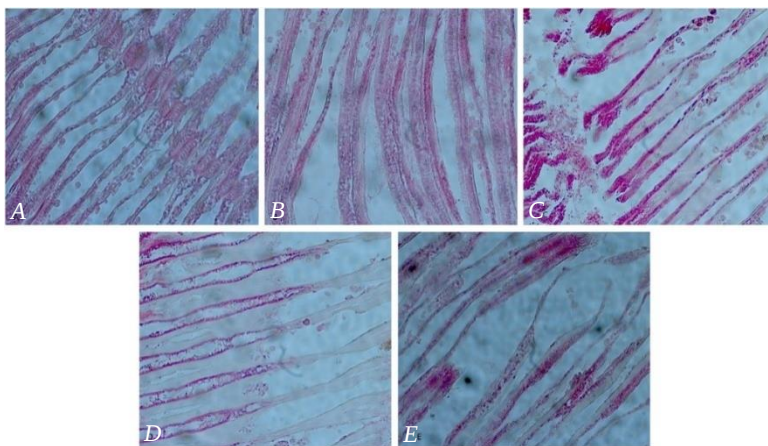


Рис. 3. Ткани жабр *A. boucardi* после 48 часов воздействия сварочных суспензий: А – контроль; В – WE-10; С – WW-10; D – CE-10; E – CW-10 (гематоксилин-эозин x200)
[Fig. 3. *A. boucardi* gill tissues after 48 hours of exposure to welding suspensions: A) control; B) WE-10; C) WW-10; D) CE-10; E) CW-10 (hematoxylin-eosin x200)]

В ткани жабр в экспериментальных группах нормального гистологического строения признаков гипертрофии, дистрофии, атрофии и некроза не обнаружено. В ткани пищеварительной железы в экспериментальных группах также нормального гистологического строения признаков патологических изменений не обнаружено (рис. 4).

Проведен морфометрический анализ клеток эпителия жабр и эпителия пищеварительной железы. Измерялись длина, ширина и площадь ядер и клеток. Было измерено по 100 клеток у каждого моллюска в контрольной и экспериментальных группах. После этого полученные данные были подвергнуты статистической обработке.

При анализе полученных данных мы не обнаружили достоверных изменений размеров ядер и клеток эпителия жабр в экспериментальных группах по сравнению с контрольной группой (табл. 3).

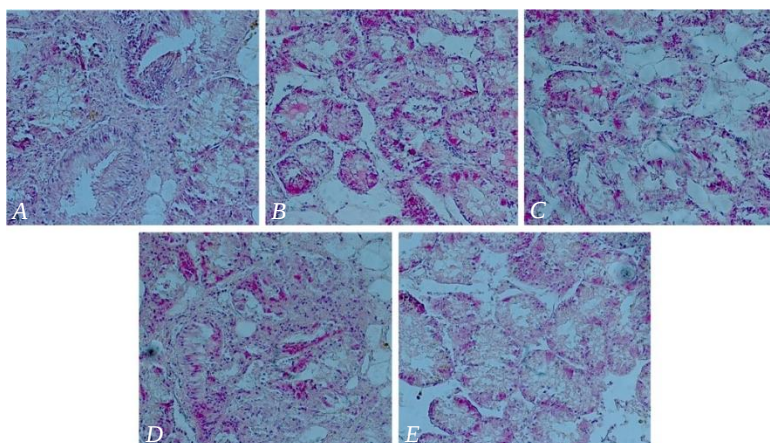


Рис. 4. Пищеварительная железа *A. boucardi* после 48 часов воздействия сварочных суспензий: А – контроль; В – WE-10; С – WW-10; D – CE-10; E – CW-10 (гематоксилин-эозин x200)

[Fig. 4. Digestive gland of *A. boucardi* after 48 hours of exposure to welding suspensions: A) control; B) WE-10; C) WW-10; D) CE-10; E) CW-10 (hematoxylin-eosin x200)]

Таблица 3 [Table 3]

Морфометрические параметры эпителия жаберных клеток *A. boucardi* в контрольной и экспериментальных группах
[Morphometric parameters of the epithelium of *A. boucardi* gill cells in the control and experimental groups]

Группа [Group]	Длина ядра, мкм [Nucleus Length, μm]	Ширина ядра, мкм [Nucleus Width, μm]	Площадь ядра, мкм ² [Nucleus Area, μm^2]	Длина клетки, мкм [Cell Length, μm]	Ширина клетки, мкм [Cell Width, μm]	Площадь клетки, мкм ² [Cell Area, μm^2]
Контроль [Control]	6,07±1,11	5,41±0,86	19,03±3,46	12,04±0,89	9,18±1,06	76,71±10,01
WE-1	5,91±0,95	4,91±0,69	18,23±3,57	11,26±0,91	8,58±0,95	67,51±8,92
WE-10	5,59±0,84	4,16±0,84	16,03±3,88	11,86±0,83	8,83±1,28	75,84±11,19
WW-1	5,48±0,79	4,54±0,74	15,32±3,45	12,17±1,06	9,02±1,12	76,91±9,83
WW-10	6,01±0,93	5,17±0,86	17,13±3,41	11,84±0,79	10,81±0,96	80,17±11,61
CE-1	5,80±0,85	4,86±0,79	16,22±3,37	10,66±0,80	8,98±0,95	67,87±9,95
CE-10	5,39±0,91	4,57±0,74	15,63±2,98	12,15±1,01	8,83±1,31	73,85±11,32
CW-1	5,37±0,89	4,74±0,75	15,39±3,55	11,87±0,85	8,52±1,36	75,91±9,71
CW-10	5,87±0,83	5,34±0,71	17,08±3,71	12,51±1,12	10,21±1,07	68,44±10,23

Примечание. $p < 0,05$.

Морфометрический анализ клеток эпителия пищеварительной железы также не выявил достоверных отличий размеров ядер и клеток в сравнении с контролем (табл. 4).

При анализе литературы мы не нашли публикаций о влиянии на гидробионтов нано- и микрочастиц, образующихся в результате подводной сварки. Это свидетельствует о том, что данное направление практически не изучено. Однако ранее мы провели похожий эксперимент по оценке кратковременного воздействия в течение 48 ч многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ) (12–14 нм, концентрация МУНТ в морской воде 100 мг/л)

на двустворчатых моллюсках *Modiolus modiolus*. Конечно, химический состав МУНТ значительно отличается от нано- и микрочастиц, образующихся в результате подводной сварки, но у них тоже есть примеси металлов. В кишечнике, пищеварительной железе и жабрах агрегаты МУНТ вызывают гистопатологические изменения эпителия (эрозии, некроз, тенденция к усилению вакуолизации клеток) и набухание соединительной ткани. В жаберном эпителии через 48 ч наблюдаются признаки, морфологически соответствующие апоптозу [13]. Наличие патологических изменений в эксперименте МУНТ и отсутствие их в данном эксперименте мы связываем с тем, что МУНТ имеют меньший размер и легче проходят через защитные барьеры.

Таблица 4 [Table 4]

Морфометрические параметры клеток *A. boucardi* пищеварительной железы в контрольной и экспериментальных группах
[Morphometric parameters of *A. boucardi* cells of the digestive gland in the control and experimental groups]

Группа [Group]	Длина ядра, мкм [Nucleus Length, μm]	Ширина ядра, мкм [Nucleus Width, μm]	Площадь ядра, мкм ² [Nucleus Area, μm^2]	Длина клетки, мкм [Cell Length, μm]	Ширина клетки, мкм [Cell Width, μm]	Площадь клетки, мкм ² [Cell Area, μm^2]
Контроль [Control]	5,75±0,85	5,11±0,81	16,98±3,91	14,28±2,54	9,24±2,01	78,35±15,69
WE-1	5,84±0,76	5,08±0,67	15,56±3,63	13,88±2,34	10,27±1,92	78,53±14,17
WE-10	5,49±0,69	4,77±0,56	15,67±3,15	13,23±1,82	9,47±1,29	76,97±14,32
WW-1	4,98±0,80	4,50±0,58	15,36±3,25	12,98±2,58	9,41±1,71	83,07±15,97
WW-10	6,06±0,64	5,01±0,69	17,18±4,21	15,68±3,14	9,34±2,18	77,36±14,39
CE-1	5,63±0,68	4,57±0,57	15,75±3,16	13,43±1,92	9,67±1,49	76,23±13,02
CE-10	5,94±0,73	4,98±0,70	16,16±4,03	13,78±2,14	10,28±1,53	78,07±13,17
CW-1	5,97±0,60	4,20±0,58	15,17±3,35	14,08±2,08	9,50±1,81	75,97±14,48
CW-10	5,74±0,79	4,88±0,71	15,96±3,43	13,68±1,94	10,06±1,67	82,13±16,01

Примечание. $p < 0,05$.

Отсутствие тканевой реакции *A. boucardi* на частицы, полученные в результате подводной сварки, наиболее вероятно, связано с кратковременностью воздействия, для выявления реакции потребуется проведение эксперимента с увеличением времени воздействия на живые тест-объекты.

Заключение

Согласно полученным в результате нашего исследования данным, микро- и наночастицы, образующиеся в результате подводной сварки, даже при кратковременном воздействии в течение 48 ч, оказывают токсическое воздействие на организм *A. boucardi*. Это проявилось в виде снижения поляризации мембран гемоцитов *A. boucardi* в экспериментальных группах. По степени воздействия образцы расположились в следующем порядке: Welding Electrode > Cutting Wire > Welding Wire > Cutting Electrode.

Разная степень воздействия, наиболее вероятно, обусловлена различным химическим составом электродов и проволоки, используемых в эксперименте. Мы не наблюдали дозозависимого эффекта при воздействии исследуемых образцов в разных концентрациях. Возможно, это связано с кратко-

срочностью воздействия производными частицами подводной сварки на живые тест-объекты. С этим мы также связываем отсутствие патологических изменений в жабрах и пищеварительной железе *A. boucardi*. Необходимы дальнейшие исследования в этой области, проведение не только острых, но и субхронических токсикологических экспериментов для оценки физиологических эффектов и опасности для окружающей среды частиц, образующихся при подводной сварке.

Список источников

1. Madatov N.M. Welding and Cutting of Metals under Water. Moscow // International Journal of Machine Engineering. 1975. P. 4–9.
2. Hedberg Y.S. et al. Welding fume nanoparticles from solid and flux-cored wires: Solubility, toxicity, and role of fluorides // Journal of Hazardous Materials. 2021. Vol. 413. Art. 125273.
3. Развитие электроннои сварки. Перспективы // ООО «СпецЭлектрод». 2023. 09.11. URL: https://www.spetselectrode.ru/download/Razvitie_podvodmoy_svarki/1.htm (дата обращения: 09.11.2023).
4. Kirichenko K.Y., Pikula K.S., Zakharenko A.M., Gridasov A.V., Parshin S.G., Medvedev S.A., Vakhniuk I.A., Golokhvast K.S. Ecotoxicological assessment of underwater welding impact during the construction of marine pipelines // International Journal of Taylor & Francis Group. 2021. P. 222–230.
5. Pikula K. et al. The Impact of Metal-Based Nanoparticles Produced by Different Types of Underwater Welding on Marine Microalgae // Toxics. 2023. № 2. P. 105.
6. Лохов А.С., Кравчишина М.Д., Ключиткин А.А., Коченкова А.И. Измерение характеристик взвешенных частиц Баренцева моря IN SITU с помощью лазерного дифрактометра LISST-deep // Океанология. 2020. № 60 (5). С. 747–776.
7. Bilal M. et al. Biosorption: an interplay between marine algae and potentially toxic elements – a review // Marine drugs. 2018. № 2. P. 65.
8. Wu F., Harper B.J., Harper S.L. Comparative dissolution, uptake, and toxicity of zinc oxide particles in individual aquatic species and mixed populations // Environ. Toxicol. Chem. 2019. Vol. 38. P. 591–602.
9. Жирмунский А.В. Животные и растения залива Петра Великого. Л.: Наука, 1976. 364 с.
10. Sabnis R.W., Deligeorgiev T.G., Jachak M.N., Dalvi T.S. DiOC(6)(3): A useful dye for staining the endoplasmic reticulum // Biotech. Histochem. 1997. Vol. 72. P. 253–258.
11. Grégori G., Denis M., Lefèvre D., Beker B. A flow cytometric approach to assess phytoplankton respiration // Advanced Flow. Cytometry: Applications in Biological Research. Springer : Dordrecht, 2003. P. 99–106.
12. Коржевский Д.Э., Гиляров А.В. Основы гистологической техники. СПб.: СпецЛит, 2010. 95 с.
13. Anisimova A.A., Chaika V.V., Kuznetsov V.L., Golokhvast K.S. Study of the Influence of Multiwalled Carbon Nanotubes (12–14 nm) on the Main Target Tissues of the mollusk *Modiolus modiolus* (Bivalvia) // Nanotechnologies in Russia. 2015. Vol. 10, № 3–4. P. 278–287.

References

1. Madatov N. M. Welding and Cutting of Metals under Water. Moscow // International Journal of Machine Engineering. 1975, pp. 4–9, 1975.
2. Hedberg Y. S. et al. Welding fume nanoparticles from solid and flux-cored wires: Solubility, toxicity, and role of fluorides // Journal of Hazardous Materials. 2021. 413. p. 125273.
3. Development of electronic welding. The prospects. [Electronic resource] // LLC "Spetsel-elektrod" / 2023 Date of update: 11/19/2023 URL:https://www.spetsselectrode.ru/download/Razvitie_podvodmoy_svarki/1.htm (date of access: 11/19/2023).
4. Kirichenko K.Y., Pikula K.S., Zakharenko A.M., Gridasov A.V., Parshin S.G., Medvedev S.A., Vakhniuk I.A., Golokhvast K.S. Ecotoxicological assessment of underwater welding

- impact during the construction of marine pipelines // International Journal of Taylor & Francis Group. 2021. pp. 222-230.
5. Pikula K. et al. The Impact of Metal-Based Nanoparticles Produced by Different Types of Underwater Welding on Marine Microalgae //Toxics. – 2023.11. №. 2. p. 105.
 6. A. S. Lokhov, M. D. Kravchishina, A. A. Klyuvitkin, A. I. Kochenkova Measurement of the characteristics of suspended particles of the Barents Sea in SITU using a LISST-deep laser diffractometer // Oceanology. 2020. No. 60(5). pp. 747-776.
 7. Bilal M. et al. Biosorption: an interplay between marine algae and potentially toxic elements—a review // Marine drugs. 2018. №. 2. p. 65.
 8. Wu, F.; Harper, B.J.; Harper, S.L. Comparative dissolution, uptake, and toxicity of zinc oxide particles in individual aquatic species and mixed populations. Environ. Toxicol. Chem. 2019, 38, pp. 591-602.
 9. Zhirmunsky A.V. Animals and plants of Peter the Great Bay. Leningrad: Nauka, 1976. 364 p.
 10. Sabnis, R.W.; Deligeorgiev, T.G.; Jachak, M.N.; Dalvi, T.S. DiOC(6)(3): A useful dye for staining the endoplasmic reticulum. Biotech. Histochem. 1997, 72, pp. 253–258.
 11. Grégori, G.; Denis, M.; Lefèvre, D.; Beker, B. A flow cytometric approach to assess phytoplankton respiration. In Advanced Flow. Cytometry: Applications in Biological Research; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2003; pp. 99–106
 12. Korzhevsky D. E. Gilyarov A.V. Fundamentals of histological technique. Special Edition 2010.
 13. Anisimova A.A., Chaika V.V., Kuznetsov V.L., Golokhvast K.S. Study of the Influence of Multiwalled Carbon Nanotubes (12–14 nm) on the Main Target Tissues of the mollusk *Modiolus modiolus* (Bivalvia) // Nanotechnologies in Russia, 2015. Vol. 10, № 3-4. P. 278–287.

Информация об авторах:

Кириченко Константин Юрьевич – в.н.с. Сибирского федерального исследовательского центра агробиотехнологий Российской академии наук (Краснообск, Россия).

E-mail: kirichenko@sfsca.ru

Пикула Константин Сергеевич – научный сотрудник НОЦ нанотехнологий Дальневосточного федерального университета (Владивосток, Россия).

E-mail: pikula_ks@dvfu.ru

Чайка Владимир Викторович – д-р биол. наук, в.н.с. Сибирского федерального исследовательского центра агробиотехнологий Российской академии наук (Краснообск, Россия).

E-mail: chayka@sfsca.ru

Анисимова Анна Алимовна – канд. биол. наук, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия).

E-mail: anisimova.aa@dvfu.ru

Черноусов Владимир Александрович – м.н.с. Сибирского федерального исследовательского центра агробиотехнологий Российской академии наук (Краснообск, Россия).

E-mail: chernousov@sfsca.ru

Паршин Сергей Георгиевич – проф. Высшей школы физики и технологий материалов Санкт-Петербургского политехнического университета (Санкт Петербург, Россия).

E-mail: parshin@spbstu.ru

Агошков Александр Иванович – д-р техн. наук, проф., проф. Инженерной школы Дальневосточного федерального университета (Владивосток, Россия).

E-mail: agoshkov.ai@dvfu.ru

Гридазов Александр Валентинович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой сварочного производства Инженерной школы Дальневосточного федерального университета (Владивосток, Россия).

E-mail: gridasov.av@dvfu.ru

Паршина Юлия Сергеевна – студент биологического факультета Санкт-Петербургского политехнического университета (Санкт Петербург, Россия).

E-mail: st068842@student.spbu.ru

Погодаев Антон Васильевич – ст. преподаватель Департамента промышленной безопасности Дальневосточного федерального университета (Владивосток, Россия).

E-mail: pogodaev.av@dvfu.ru

Голохваст Кирилл Сергеевич – член-корр. РАО, профессор РАН, д-р биол. наук, г.н.с. Сибирского федерального исследовательского центра агробιοтехнологий Российской академии наук (Краснообск, Россия); с.н.с. лаборатории исследования и применения сверхкритических флюидных технологий в агропищевых биотехнологиях Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия).

E-mail: golokhvast@sfsca.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Konstantin Yu. Kirichenko, Leading Researcher at the Siberian Federal Research Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Russian Federation).

E-mail: kirichenko@sfsca.ru

Konstantin S. Pikula, Researcher at the REC of Nanotechnology of the Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

E-mail: pikula_ks@dvfu.ru

Vladimir V. Chaika, Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher at the Siberian Federal Research Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Russian Federation).

E-mail: chayka@sfsca.ru

Anna A. Anisimova, Candidate of Biological Sciences, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

E-mail: anisimova.aa@dvfu.ru

Vladimir A. Chernousov, Junior Researcher at the Siberian Federal Research Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Russian Federation).

E-mail: chernousov@sfsca.ru

Sergey G. Parshin, Professor, Higher School of Physics and Technology of Materials St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russian Federation).

E-mail: parshin@spbstu.ru

Alexander I. Agoshkov, doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Engineering School of the Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

E-mail: agoshkov.ai@dvfu.ru

Alexander V. Gridasov, Candidate of Technical Sciences, Director of the Department of the Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

E-mail: gridasov.av@dvfu.ru

Yulia S. Parshina, Saint Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russian Federation).

E-mail: st068842@student.spbu.ru

Anton V. Pogodaev, Senior Lecturer at the Department of Industrial Safety of the Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

E-mail: pogodaev.av@dvfu.ru

Kirill S. Golokhvast, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher of the Siberian Federal Research Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Russian Federation); Senior Researcher, Laboratory for research and application of supercritical fluid technologies in agri-food biotechnologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 22.11.2023;
одобрена после рецензирования 10.12.2023; принята к публикации 22.12.2023.*

*The article was submitted 22.11.2023;
approved after reviewing 10.12.2023; accepted for publication 22.12.2023.*