

УДК 577.1:577.41

DOI: 10.18384/2310-7189-2016-3-74-83

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА МЕДИ (II) И ИОНА CU НА ОБРАЗОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ПЕРЕКИСНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЛИПИДОВ В ЖАБРАХ МИДИИ ГРЕЯ *CRENOMYTILUS GRAYANUS* (DUNKER, 1853) (BIVALVIA: MYTILIDAE) В УСЛОВИЯХ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Фадеева Ю.И.¹, Слободскова В.В.², Кавун В.Я.¹, Челомин В.П.²

¹ Институт биологии моря им. А.В. Жирмунского, Дальневосточное отделение Российской академии наук

690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Дальневосточное отделение Российской академии наук

690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

Аннотация. Проведена сравнительная оценка влияния наночастиц CuO (НЧ CuO; 20 мкг/л) и ионов Cu (12 мкг/л) на образование продуктов перекисного окисления липидов (малоновый диальдегид МДА), 4-гидрокси-2,3-ноненаль (4-HNE) в жабрах *Crenomytilus grayanus* в условиях лабораторного эксперимента. Полученные результаты свидетельствуют о низкой биодоступности наночастиц CuO для мидии Грея. При этом в жабрах моллюсков как в эксперименте с НЧ, так и с ионами меди, были отмечены изменения содержания МДА и 4-HNE, отличные от таковых в группе контроля. Учитывая факт отсутствия значительного накопления Cu в группе с НЧ CuO, высказано предположение о косвенном проявлении токсичности наночастиц оксида меди.

Ключевые слова: наночастицы, CuO, *Crenomytilus grayanus*, малоновый диальдегид, 4-гидрокси-2,3-ноненаль, продукты перекисного окисления липидов.

EFFECTS OF NANOPARTICLES AND IONS COPPER ON THE FORMATION PRODUCTS OF LIPID PEROXIDATION IN ORGANS MUSSELS *CRENOMYTILUS GRAYANUS* (DUNKER, 1853) (BIVALVIA: MYTILIDAE) UNDER LABORATORY CONDITIONS

Yu. Fadeeva¹, V. Kavun¹, V. Slobodskova², V. Chelomin²

¹ National Scientific Center of Marine Biology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences

ul. Pal'chevskogo 17, 690041 Vladivostok, Russia

² V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences

ul. Baltiiskaya 43, 690041 Vladivostok, Russia

Abstract. A comparative evaluation is performed of the effect of CuO (CuO NPs; 20 mkg/l) and Cu (12 mkg/l) nanoparticles on the formation of lipid peroxidation products (malondialdehyde

(MDA), 4-hydrox-2,3-inonenal (4-HNE)) in gills of a mussel in a laboratory experiment. The results demonstrate low bioavailability of CuO NPs that we have used for the mussels. Moreover, in gills of molluscs, in the experiment with particles and copper ions we have observed changes in the content of MDA and 4-HNE as compared to those in the control group. Taking into account the fact that there is no considerable accumulation of Cu in the group with CuO NPs, the manifestation of its toxicity is suggested to be indirect.

Key words: nanoparticles, CuO, *Crenomytilus grayanus*, malondialdehyde, 4-hydrox-2,3-inonenal, lipid peroxidation products.

В результате разносторонней деятельности человека прибрежные акватории постоянно подвергаются влиянию, которое нередко приводит к различным негативным последствиям. В настоящее время масштабы загрязнения морских экосистем все сильнее опережают возможности научнообоснованных оценок и прогнозирования последствий антропогенного воздействия. В связи с этим особое внимание уделяется вопросам влияния различных токсических веществ на жизнедеятельность морских организмов. В последние годы все чаще появляются работы, связанные с исследованиями токсичности наночастиц (НЧ), особенно тяжелых металлов, благодаря тому, что интенсивное их производство и использование может в конечном итоге привести к попаданию последних в морские прибрежные акватории [12; 5]. Так, например, наночастицы оксида меди входят в состав многих приспособлений, таких, как газовые датчики, катализаторы, батареи, высокотемпературные сверхпроводники, преобразователи солнечной энергии [18], компьютерные процессоры, чернила принтеров, антивозрастные крема для кожи и минеральные добавки [15], а также используются в качестве антибактериальных добавок [8].

Хотя принято противопоставлять токсичность НЧ CuO токсичности

ионов Cu, стоит отметить, что из НЧ металлов при определённых условиях могут образовываться ионные формы. Например, ионы Cu и Zn образуются из НЧ CuO и ZnO в кислой среде (pH = 4,5). При этом концентрация образовавшихся ионов Cu²⁺ и Zn²⁺ в нейтральной среде мала, а потенциальные последствия их попадания в водную среду могут быть значительными, так как эти ионы отличаются высокой токсичностью [7]. Также помимо частичного перехода CuO в ионную медь в жидкостях, НЧ сами по себе могут служить причиной образования активных радикалов, которые, взаимодействуя с органическими молекулами: липидами, белками, нуклеиновыми кислотами, приводят к развитию окислительного стресса [9]. Одними из главных показателей степени развития окислительного стресса являются малоновый диальдегид (МДА) и 4-гидрокси-2,3-ноненаль (4-HNE), при этом МДА считается мутагенным, а 4-HNE – наиболее токсичным метаболитом перекисного окисления липидов [10].

На сегодняшний день существуют отдельные немногочисленные работы, демонстрирующие токсическое влияние НЧ на рыб [11], земноводных [5], человека [6], но, к сожалению, работ, посвящённых воздействию наночастиц на морских беспозвоночных, довольно мало. В связи с чем цель нашей

работы состояла в сравнении (сопоставлении) биодоступности НЧ CuO (наноформа, 20 мкг/л) и Cu (ионная форма, 12 мкг/л) и их влияния на образование продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) МДА, 4-HNE в жабрах *Crenomytilus grayanus* в лабораторном эксперименте. Морской двустворчатый моллюск *C. grayanus* широко используется в экотоксикологических исследованиях, связанных с биоаккумуляцией тяжелых металлов [7], хлорорганических пестицидов [1] и радионуклидов [17], а также при изучении механизмов токсического действия комплексного загрязнения [3; 2].

Материалы и методы исследования

Моллюски *Crenomytilus grayanus* примерно равного размера ($13,18 \pm 0,62$ см) были отобраны из акватории о-ва Рейнеке (фоновый район, залив Петра Великого, Японское море) [16]. Исходную группу мидий выдержали в аквариуме в воде из фонового района в течение двух дней после отбора. Затем часть моллюсков препарировали и извлекли жабры. Другую часть поместили на 7 сут. в аквариумы с морской водой для акклиматизации. После животных разделили на 3 группы и переместили в 100-литровые аквариумы, наполненные морской водой из аквариальной установки Института биологии моря ДВО РАН из расчета 1 экз. на 2 л.

Первая группа мидий («контрольная») в количестве 46 экз. была помещена в аквариум с чистой водой, 2-я и 3-я («экспериментальные») группы по 44 экз. – в два аквариума, один – с НЧ CuO (20 мкг/л), другой – с ионами Cu (12 мкг/л). Выбранные нами концентрации двух форм Cu, широко ис-

пользуются в экотоксикологических исследованиях для изучения генотоксичности данного элемента [4; 12]. В целом эксперимент длился 60 сут. Воду в аквариумах меняли через каждые 24 ч. В течение первых 30 сут. для получения необходимой концентрации НЧ CuO и Cu^{2+} в аквариумы вносили по 20 мл соответствующих растворов. В течение вторых 30 сут. длился период «очистки». Для подготовки рабочих растворов в 100 мл дистиллированной воды растворяли 0,0125 г порошка CuO (<50 нм, $29 \text{ м}^2/\text{г}$, “Sigma-Aldrich”) и 0,0251 г $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (квалификация – ЧДА). Перед каждым внесением в аквариум растворы перемешивали на ультразвуковой бане (44 кГц) в течение 20 мин. В ходе эксперимента каждые 10 сут. отбирали по 5 мидий из каждого аквариума. Мидий препарировали и выделяли жабры.

В ходе эксперимента измеряли показатели солености ($32,11 \pm 1,1 \text{‰}$), температуры ($17 \pm 0,5^\circ\text{C}$) и pH ($7,97 \pm 0,32$). Также определяли содержание Cu в воде из района сбора моллюсков (о-в Рейнеке, $0,19 \pm 0,05$ мкг/л) и в месте водозабора для аквариальной ($0,36 \pm 0,07$ мкг/л). Мидий во время эксперимента не кормили дополнительно, смертность животных не зарегистрирована.

Исследуемые органы высушивали при 85°C и минерализовали концентрированной HNO_3 марки ОСЧ. Концентрацию металлов определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на приборах Shimadzu-6800F и Shimadzu-6800G. Контроль качества определений включал измерение концентраций металлов в используемых кислотах, дубликатах проб и сертифицированных образцах моллюсков (NBS SRM 1566a

и ERM-CE278k). Среднее отклонение для Cu от паспортных данных стандартных образцов составляло 5%. Средние значения концентраций металла и стандартное отклонение определяли с помощью пакета программ Excel. Достоверность различий между выборками определяли по t-критерию Стьюдента с использованием пакета программ Statistica.

Интенсивность ПОЛ оценивали путем определения концентрации малонового диальдегида и 4-гидрокси-2,3-ноненаля при перекисном окислении полиненасыщенных жирных кислот, согласно описанному методу [13]. Этот процесс основан на реакции двух моль N-метил-2-фенилиндола, хромогенного агента, с одним моль либо МДА (в присутствии HCl), либо с комплексом продуктов ПОЛ (в присутствии метилсульфоновой кислоты (MSA)) при температуре 45°C в течение 60 мин с получением стабильного хромофора, который имеет максимальное поглощение при 586 нм. Концентрация 4-HNE равнялась разнице между общим комплексом продуктов ПОЛ и МДА. Содержание продуктов ПОЛ выражали в нмоль/г сыр. массы.

Результаты и обсуждение

Результаты эксперимента показали, что накопление Cu в жабрах моллюсков группы с НЧ CuO практически не отличались от контрольной группы на протяжении всего эксперимента. В целом, в исследуемом органе мидий этих групп не было зарегистрировано значительного накопления наноформы меди (рис. 1). В свою очередь, у моллюсков, находящихся на экспозиции в аквариуме с ионной формой меди, в первой половине эксперимента было

зарегистрировано достоверное повышение ее концентрации в исследуемом органе на 10-е и 30-е сут. (в 2 и 4 раза соответственно) по сравнению с контролем. В период «очистки» содержание этого металла резко снизилось (в 4 раза) на 40-е и 50-е сут. эксперимента.

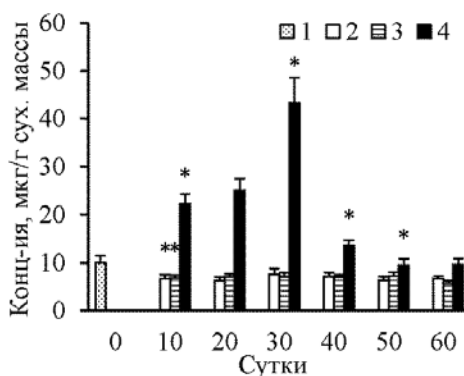


Рис. 1. Динамика изменения концентрации Cu в жабрах *Srenomytilus grayanus*:

1 – исходная концентрация, 2 – контроль, 3 – наноформа, 4 – ионная форма. * – отличие от контроля достоверно при $p \leq 0,05$.

Несмотря на сходные изменения содержания Cu в жабрах моллюсков групп контроля и с НЧ CuO, динамики содержания продуктов ПОЛ (МДА, 4-HNE) значительно отличались (рис. 2А). У контрольной группы моллюсков достоверные изменения концентрации малонового диальдегида на первом этапе эксперимента заключались в его повышении на 20-е сут. (примерно в 1,5 раза) с последующим снижением на 30-е сут. В период с 50-х по 60-е сут. содержание этого продукта ПОЛ увеличилось, достигнув значения, превышающего исходное в 2 раза (рис. 2А). В жабрах мидий группы с НЧ меди концентрация МДА резко возросла уже на 10-е сут. эксперимента, превысив ее уровень в контрольной

группе (примерно в 1,5 раза). В период с 20-х по 30-е сут. уровень содержания этого продукта снова снизился до исходного значения. На этапе «очистки» (40-е и 50-е сут.), напротив, отмечено накопление МДА почти в 2 и 2,5 раза соответственно (рис. 2А). К концу эксперимента концентрация малонового диальдегида в экспериментальной группе с НЧ меди сравнялась со значением контрольной группы. У группы мидий, содержащихся в аквариуме с ионами меди, были отмечены достоверные повышения содержания МДА на 10, 30, 50-е сут. (в 1, 1,5 и 2 раза соответственно). При этом повышения концентраций МДА чередовались с его понижениями на 20, 40, 60-е сут. (1/2, 1,2 и 1,5 раза) (рис. 2А).

В динамике содержания 4-HNE в жабрах контрольных мидий отмечено постепенное его накопление на 20-е и 30-е сут. эксперимента (в 2,5 раза от исходного) с дальнейшим значительным колебанием концентрации этого продукта на 40–60 сут. В жабрах моллюсков группы с НЧ меди на 10-е сут. было отмечено резкое повышение концентрации 4-HNE, что значительно превысило содержание 4-HNE в группе контроля и группе с ионной медью, в 2,5 и 1,5 раза соответственно. На 20-е сут. концентрация этого продукта ПОЛ снизилась в 1,5 раза по сравнению с 10 сут. и практически не изменялась до 40-х сут. эксперимента. Далее (на 50 сут.) уровень содержания 4-HNE значительно возрос с последующей стабилизацией до конца эксперимента (рис. 2Б). В группе мидий с ионной медью изменения концентрации 4-HNE на первом этапе эксперимента заключались в повышении на 10-е сут. На 30-е и 40-е сутки содержание этого продукта было практиче-

ски одинаковым. После такого относительно стабильного уровня содержания 4-HNE в жабрах моллюсков, на 50-е сут. отмечено увеличение этого продукта в 1,5 раза, с последующим снижением на 60-е сут. до значений контрольной группы (рис. 2Б). Стоит отметить, что в жабрах мидий всех трех (экспериментальных и контрольной) групп содержание 4-HNE на 40-е сут. было практически на одном уровне.

Таким образом, резюмируя полученные результаты, можно выделить следующие наиболее важные изменения продуктов ПОЛ в жабрах *S. grayanus*, предположительно, вызванные аккумуляцией меди. Интересен тот факт, что в жабрах мидий из группы с ионной медью при накоплении Cu концентрация МДА активно регулировалась в течение всего эксперимента, о чем свидетельствует пилообразная кривая (рис. 2А). Максимум содержания этого продукта был отмечен в период «очистки» на 50-е сут. эксперимента, вслед за этим на 60-е сут. оно опустилось практически до концентрации группы контроля в этот период. На фоне изменений содержания МДА в течение эксперимента, динамика концентрации 4-HNE после увеличения на 10-е сут. отличалась стабильностью до 40-х сут. эксперимента. В жабрах мидий из аквариума с НЧ на 10-е сут. отмечены скачки содержания обоих продуктов ПОЛ (рис. 2).

Сопоставление динамики накопления меди в органах моллюсков из аквариума с НЧ CuO и из контрольной группы свидетельствует об отсутствии существенного накопления наночастиц оксида меди в жабрах *S. grayanus*. Такое явление может быть связано с рядом причин, например,

с низкой биодоступностью, обусловленной свойствами НЧ CuO и специфично-видовой защитной стратегией моллюсков. Несмотря на это, в органах моллюсков двух групп наблюдалось накопление продуктов ПОЛ, что свидетельствует об увеличении токсической нагрузки на организм.

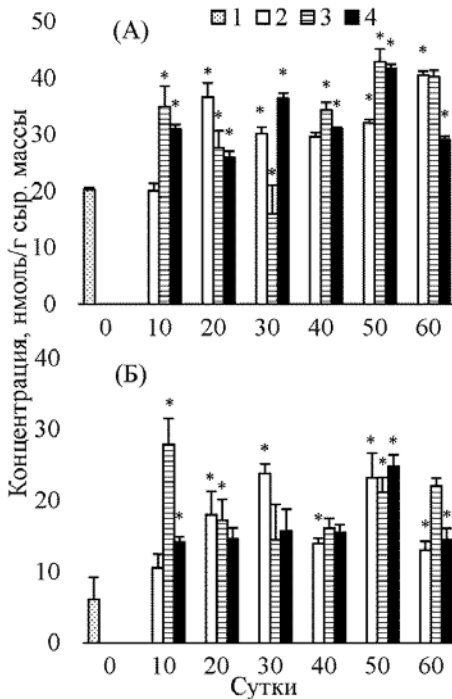


Рис. 2. Динамика изменения концентрации ПОЛ в жабрах *Crenomytilus grayanus*: А- МДА, Б- 4-ННЕ. 1 – исходная концентрация, 2 – контроль, 3 – наноформа, 4 – ионная форма. * – отличие от контроля достоверно при $p \leq 0,05$.

Известно, что активное вмешательство чужеродного агента в окис-

лительный метаболизм прямо или косвенно сопряжено с усилением генерации высокорекреационных радикалов кислорода, в результате чего в клетке развивается окислительный стресс [14; 15]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что действие меди является одной из причин образования продуктов ПОЛ в жабрах *C. grayanus*. Учитывая факт отсутствия значительного накопления Cu в жабрах моллюсков из группы с НЧ CuO, можно судить о косвенной токсичности наночастиц оксида меди.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что отсутствие существенного накопления меди в жабрах моллюсков *C. grayanus* из экспериментальной группы с НЧ CuO определяется низкой биодоступностью исследованной нами формы меди.

Несмотря на это, в жабрах моллюсков группы с НЧ и ионами меди были отмечены изменения содержания МДА и 4-ННЕ, отличные от таковых в контрольной группе мидий.

В настоящее время механизмы завуалированного проявления биологической активности (токсичности) наночастиц неясны, а если учитывать огромные масштабы производства и поступления наночастиц в биосферу, то важность исследований в этом направлении не вызывает сомнений. Для того, чтобы в полной мере прояснить и оценить значение выявленных в нашей работе изменений, необходимы дальнейшие более разносторонние исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боярова М.Д. Современные уровни содержания хлорорганических пестицидов в водных организмах залива Петра Великого (Японское море) и озера Ханка: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток, 2008. 130 с.
2. Подгурская О.В., Кавун В.Я. Оценка адаптационно-защитного потенциала двустворчатых моллюсков *Modiolus modiolus* (Linnaeus, 1758) и *Crenomytilus grayanus* (Dunker, 1853) в условиях повышенного содержания тяжелых металлов в среде // Биол. моря. 2012. Т. 38 (№ 2). С. 174–182.
3. Шиян А.А. Влияние нанопорошков оксидов металлов на успех прохождения личиночных стадий развития озёрной лягушки (*Rana Ridibunda Pall.*) // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). 2011. № 02 (66). С. 289–299.
4. Amultile biomarker approach to investigate the affects of copper on the marine bivalve mollusc, *Mytilus edulis* / S.N. Al-Subiai et al. // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2011.V. 74. P. 1913–1920.
5. Bivalve mollusks as a unique target group for nanotoxicity / L. Canesi et. al. // Mar. Environ. Res. 2012. Vol. 76. P. 16–21.
6. CuO Nanoparticle Interaction with Human Epithelial Cells: Cellular Uptake, Location, Export, and Genotoxicology / Z. Wang et. al. // Chem. Res. Toxicol. 2012. Vol 25. P. 1512–1521.
7. Cytotoxicity in the age of nano: The role of fourth period transition metal oxide nanoparticle physicochemical properties / Ch. C. Chusuei et. al. // Chem. Biol. Interact. 2013. Vol. 206. P. 319–326.
8. Dastjerdi R., Montazer M. A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties // Colloids Surf., B. 2010. Vol. 79. P. 5–18.
9. Effects of copper nanoparticles exposure in the mussel *Mytilus galloprovincialis* / T. Gomes et. al. // Environ. Sci. Technol. 2011. Vol. 45, no. 21. P. 9356–9362.
10. Esterbauer H., Eckl P., Ortner A. Possible mutagens derived from lipids and lipid precursors // Mutation Res. 1990. Vol. 238, no. 3. P. 223–233.
11. Federici G., Shaw B.J., Handy R.D. Toxicity of titanium dioxide nanoparticles to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Gill injury, oxidative stress, and other physiological effects // Aquat. Toxicol. 2007. Vol. 87. P. 415–430.
12. Moore M.N. Do nanoparticles present ecotoxicological risks for the heals of the aquatic environment? // Environ. Int. 2006. Vol 32. P. 967–976.
13. Reactions of N-methyl-2-phenylindole with malondialdehyde and 4-hydroxyalkenals. Mechanistic aspects of the colorimetric assay of lipid peroxidation / I. Erdelmeier et al. // Chem. Res. Toxicol. 1998. no. 11. P.1184–1194.
14. Sies H. Oxidative stress: oxidants and antioxidants. London: Academic Press Limited. 1991. 650 p.
15. Shaw B.J., Handy R.D. Physiological effects of nanoparticles on fish: A comparison of nano-metals versus metal ions // Environ. Int. 2011. Vol. 37. P. 1083–1097.
16. Shulkin V.M., Presley B.J., Kavun V.Ya. Metal concentrations in mussel *Crenomytilus grayanus* and oyster *Crassostrea gigas* in relation to contamination of ambient sediments // Environ. Int. 2003. Vol. 29, no. 4. P. 493–502.
17. Tkalin A.V., Lishavskaya T.S., Shulkin V.M. Radionuclides and trace metals in mussels and bottom sediments around Vladivostok, Russia // Mar. Pollut. Bull. 1998. Vol. 36. P. 551–554.
18. The Toxic Effects and Mechanisms of CuO and ZnO Nanoparticles / Ya-Nan Chang et. al. // Materials. 2012. Vol. 5. P. 2850–2871.

REFERENCES

1. Boyarova M.D. *Sovremennye urovni sodержaniya khlororganicheskikh pestitsidov v vodnykh organizmakh zaliva Petra Velikogo (Yaponskoe more) i ozera Khanka: dissertatsiya ... kand. biol. nauk [Modern levels of organochlorine pesticides in aquatic organisms of Peter the Great Bay (Aea of Japan) and lake Khanka: diss. ... cand. biol. sciences]. Vladivostok, 2008. 130 p.*
2. Podgurskaya O.V., Kavun V.Ya. *Otsenka adaptatsionno-zashchitnogo potentsiala dvustvorchatykh mollyuskov Modiolus modiolus (Linnaeus, 1758) i Crenomytilus grayanus (Dunker, 1853) v usloviyakh povyshennogo sodержaniya tyazhelykh metallov v srede [Evaluation of adaptive-protective potential of bivalve molluscs Modiolus modiolus (Linnaeus, 1758) and Crenomytilus grayanus (Dunker, 1853) in conditions of high content of heavy metals in the environment] // Biol. morya. 2012. Vol. 38 (no. 2). Pp. 174–182.*
3. Shiyani A.A. *Vliyanie nanoporoshkov oksidov metallov na uspekhn prokhozheniya lichinochnykh stadii razvitiya ozernoi lyagushki (Rana Ridibunda Pall.) [Influence of nanopowders of metal oxides on the success of completing the larval stages of the development of lake frogs (Rana Ridibunda Pall.)] // Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyi zhurnal KubGAU). 2011. no. 02 (66). Pp. 289–299.*
4. *Amultile biomarker approach to investigate the affects of copper on the marine bivalve mollusc, Mytilus edulis / S.N. Al-Subiai et al. // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2011.V. 74. P. 1913-1920.*
5. *Bivalve molluscs as a unique target group for nanotoxicity / L. Canesi et. al. // Mar. Environ. Res. 2012. Vol. 76. P. 16–21.*
6. *CuO Nanoparticle Interaction with Human Epithelial Cells: Cellular Uptake, Location, Export, and Genotoxicology / Z. Wang et. al. // Chem. Res. Toxicol. 2012. Vol 25. P. 1512–1521.*
7. *Cytotoxicity in the age of nano: The role of fourth period transition metal oxide nanoparticle physicochemical properties / Ch. C. Chusuei et. al. // Chem. Biol. Interact. 2013. Vol. 206. P. 319–326.*
8. *Dastjerdi R., Montazer M. A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties // Colloids Surf., B. 2010. Vol. 79. P. 5–18.*
9. *Effects of copper nanoparticles exposure in the mussel Mytilus galloprovincialis / T. Gomes et. al. // Environ. Sci. Technol. 2011. Vol. 45, no. 21. P. 9356–9362.*
10. *Esterbauer H., Eckl P., Ortner A. Possible mutagens derived from lipids and lipid precursors // Mutation Res. 1990. Vol. 238, no. 3. P. 223–233.*
11. *Federici G., Shaw B.J., Handy R.D. Toxicity of titanium dioxide nanoparticles to rainbow trout (Oncorhynchus mykiss): Gill injury, oxidative stress, and other physiological effects // Aquat. Toxicol. 2007. Vol. 87. P. 415–430.*
12. *Moore M.N. Do nanoparticles present ecotoxicological risks for the health of the aquatic environment? // Environ. Int. 2006. Vol 32. P. 967–976.*
13. *Reactions of N-methyl-2-phenylindole with malondialdehyde and 4-hydroxyalkenals. Mechanistic aspects of the colorimetric assay of lipid peroxidation / I. Erdelmeier et al. // Chem. Res. Toxicol. 1998. no. 11. P. 1184–1194.*
14. *Sies H. Oxidative stress: oxidants and antioxidants. London: Academic Press Limited. 1991. 650 p.*
15. *Shaw B.J., Handy R.D. Physiological effects of nanoparticles on fish: A comparison of nano-metals versus metal ions // Environ. Int. 2011. Vol. 37. P. 1083–1097.*
16. *Shulkin V.M., Presley B.J., Kavun V.Ya. Metal concentrations in mussel Crenomytilus gray-*

- anus and oyster *Crassostrea gigas* in relation to contamination of ambient sediments // *Environ. Int.* 2003. Vol. 29, no. 4. P. 493–502.
17. Tkalin A.V., Lishavskaya T.S., Shulkin V.M. Radionuclides and trace metals in mussels and bottom sediments around Vladivostok, Russia // *Mar. Pollut. Bull.* 1998. Vol. 36. P. 551–554.
18. The Toxic Effects and Mechanisms of CuO and ZnO Nanoparticles / Ya-Nan Chang et. al. // *Materials.* 2012. Vol. 5. P. 2850–2871.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадеева Юлия Игоревна – аспирант лаборатории физиологии Института биологии моря им. А.В. Жирмунского, Дальневосточное отделение Российской академии наук;
e-mail: fadeeva-imb@mail.ru

Слободскова Валентина Владимировна – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории морской экотоксикологии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева, Дальневосточное отделение Российской академии наук;
e-mail: slobodskova@poi.dvo.ru

Кавун Виктор Яковлевич – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории физиологии Института биологии моря им. А.В. Жирмунского, Дальневосточное отделение Российской академии наук;
e-mail: Vkavun11@mail.ru

Челомин Виктор Павлович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией морской экотоксикологии Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Дальневосточное отделение Российской Академии наук;
e-mail: chelomin@poi.dvo.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fadeeva Yulia I. – post-graduate student of the Physiology Laboratory of the National Scientific Center of Marine Biology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences;
e-mail: fadeeva-imb@mail.ru

Kavun Victor Ya. – candidate of biological sciences, associate professor, senior researcher of the Physiology Laboratory of the National Scientific Center of Marine Biology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences;
e-mail: Vkavun11@mail.ru

Slobodskova Valentina V. – candidate of biological sciences, researcher of the Laboratory of Marine Ecotoxicology at the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences;
e-mail: slobodskova@poi.dvo.ru

Chelomin Victor P. – doctor of biological sciences, head of the Laboratory of Marine Ecotoxicology at the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences;
e-mail: chelomin@poi.dvo.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Фадеева Ю.И., Кавун В.Я., Слободскова В.В., Челомин В.П. Влияние наночастиц оксида меди (II) и иона Си на образование продуктов перекисного окисления липидов в жабрах мидии Грея *Crenomytilus grayanus* (Dunker, 1853) (Bivalvia: Mytilidae) в условиях лабора-

торного эксперимента // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2016. № 3. С. 74–83.

DOI: 10.18384/2310-7189-2016-3-74-83

BIBLIOGRAPHIC REFERENCE

Yu. Fadeeva, V. Kavun, V. Slobodskova, V. Chelomin. Effects of nanoparticles and ions copper on the formation products of lipid peroxidation in organs mussels *Crenomytilus grayanus* (Dunker, 1853) (Bivalvia: Mytilidae) under laboratory conditions // Bulletin of Moscow State Regional University. Series: Natural sciences. 2016. no 3. Pp. 74–83.

DOI: 10.18384/2310-7189-2016-3-74-83