

УДК 574.24

## ВЛИЯНИЕ ИОНОВ НИКЕЛЯ НА СЕРДЕЧНУЮ АКТИВНОСТЬ МИДИИ *MYTILUS EDULIS* LINNAEUS, 1758

И. Н. Бахмет<sup>1</sup>, Д. А. Екимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

<sup>2</sup> Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

Разработан оригинальный программно-аппаратный комплекс «Мидия-7Т» для дистанционной непрерывной регистрации сердечной активности моллюсков. Применение комплекса позволило оценить влияние ионов никеля ( $\text{NiCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$  в концентрации 500 мкг/л) на сердечную ритмику мидии *Mytilus edulis* Linnaeus, 1758. Показано достоверное понижение частоты сердечных сокращений через 20 минут после добавления тяжелого металла. Кроме того, через тот же временной интервал резко, в 20–100 раз, возросла групповая дисперсия показателей сердечной активности. В то же время индивидуальная дисперсия частоты сердечных сокращений увеличилась в 3–10 раз уже через 1 минуту после начала воздействия никеля. Рост дисперсии показателей сердечной активности свидетельствует о стрессовом характере воздействия. Предлагается использовать в токсикологических экспериментах при оценке реакции сердечной системы моллюсков на тяжелые металлы три показателя: изменение частоты сердечных сокращений, индивидуальную и групповую дисперсии частоты сердечных сокращений. Доказана перспективность применения разработанного комплекса в экспериментах по оценке реакции сердечной системы моллюсков на воздействия.

Ключевые слова: мидии; *Mytilus edulis* Linnaeus, 1758; частота сердечных сокращений; плетизмограмма; ионы никеля.

### I. N. Bakhmet, D. A. Ekimov. EFFECT OF NIKEL IONS ON CARDIAC ACTIVITY IN THE BLUE MUSSEL *MYTILUS EDULIS* LINNAEUS, 1758

The original device and firmware “Blue mussel-7T” was designed for distant continuous recording of mollusk cardiac activity. This device allows estimating the effect of nickel ions ( $\text{NiCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$  in 500  $\mu\text{g}/\text{l}$  concentration) on the heart rate in blue mussels *Mytilus edulis* Linnaeus, 1758. A significant decrease in the heart rate 20 minutes after the addition of the heavy metal was shown. Besides, the cross-group variance of the parameter increased sharply (20–100-fold) after the same time interval. At the same time, individual variance of the heart rate rose 3–10-fold as soon as 1 minute after nickel had been added. The increase in heart rate variance probably testifies to a stressful nature of the impact. It is suggested to use three indices in toxicological experiments estimating mollusk cardiac responses to heavy metals: heart rate change, individual and cross-group variances of heart rate indices. The new device and firmware proved to have potential for experimenting with the estimation of mollusk cardiac responses to impacts.

Key words: blue mussels; *Mytilus edulis* Linnaeus; 1758; heart rate; plethysmogram; nickel ions.

## Введение

Показатели изменения сердечной активности моллюсков в токсикологических экспериментах активно используются последние 20 лет [Marchan et al., 1999; Curtis et al., 2000; Bakhmet et al., 2012 и др.]. В указанных работах была установлена высокая чувствительность сердечной активности мидий к меди и кадмию. В то же время методика дискретной регистрации показателей, примененная в этих исследованиях, не позволяла установить точное время отклика организма моллюсков на начало воздействия токсиканта. В результате не было возможности оценивать состояние животных в постоянном режиме, что приводило к потере значительной части информации. Например, возникали проблемы при установлении латентного периода реакции организма животного на воздействие. Кроме того, в предыдущих работах даже на основе дискретных измерений сердечной активности был показан флуктуационный характер изменений частоты сердечных сокращений (ЧСС) мидий при любых резких варьированиях параметров окружающей среды. Очевидно, что длительность интервалов времени между дискретными измерениями оказывала влияние на возможности анализа таких изменений.

Обозначенные проблемы были решены благодаря разработанному в лаборатории экологического мониторинга и моделирования Карельского научного центра РАН программно-аппаратному комплексу (ПАК) «Мидия-7Т», позволяющему регистрировать сердечный ритм моллюсков в непрерывном режиме. Добавим, однако, что аналогичные приборы независимо от данной разработки созданы и в других лабораториях [Kholodkevich et al., 2008; Burnett et al., 2013], что свидетельствует об актуальности этого направления исследований.

Целью настоящей работы являлась апробация нового ПАК и усовершенствованной системы регистрации кардиоактивности, для чего в качестве предмета исследования и проводилась оценка влияния ионов никеля (Ni) на сердечную активность мидий *Mytilus edulis* Linnaeus, 1758 с применением указанного комплекса. Выбор металла объясняется, во-первых, достаточно высокой токсичностью (2 класс опасности, ПДК в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования – 0,02 мг/л [Гигиенические..., 2003]). Более того, для человека ПДК никеля составляет всего 13 мкг/г сырого веса [USFDA..., 1993] (для рыб и двустворчатых моллюсков – менее 5 мг/кг сухого веса [SFT в Molvaer et al., 1997]), а двустворчатые моллюски, как известно, могут

накапливать тяжелые металлы в своих тканях в достаточно высоких концентрациях [El-Sikaily et al., 2004; Колючкина, Исмаилов, 2011 и др.]. Во-вторых, до настоящего времени при исследованиях влияния никеля на моллюсков применяли либо гидробиологические методы (смертность, скорость роста, плотности популяций, накопление, определение скорости фильтрации) [Calabrese et al., 1977; Watling, Watling, 1982; Gissi et al., 2016 и др.], либо, гораздо реже, биохимические [Anilkumar, Meenakshi, 2012; Azizi et al., 2018]. Исследования же физиологии моллюсков при воздействии никеля отсутствуют, что подчеркивается в обзорах [Gissi et al., 2016; Aquatic..., 2002]. В нашей работе мы попытались частично восполнить этот пробел. В-третьих, концентрация никеля в Белом море находится ниже аналитического минимума [Savinova et al., 2007], что позволяет рассматривать мидий данного водоема как реперный объект.

## Материалы и методы

Работа выполнена в сентябре 2017 года на Беломорской биологической станции «Картеш» им. О. А. Скарлато Зоологического института РАН. Мидий *Mytilus edulis* Linnaeus, 1758 собирали с установок для культивирования моллюсков (глубина 2 м) при температуре воды 10 °С. В эксперименте использованы мидии возраста 2+. Длина раковин варьировала от 31 до 35 мм и составила в среднем 33 мм. Перед началом наблюдений животных в течение 3 суток акклимировали к лабораторным условиям. Моллюсков содержали в аквариумах из оргстекла с аэрируемой морской водой соленостью 25 ‰ при постоянном освещении и температуре 10 °С. Ежедневно проводилась частичная смена воды. За сутки до начала эксперимента к раковинам тестируемых животных приклеили оптические сенсоры CNY70 и поместили по 7 особей в два аквариума (один – с контрольными моллюсками, второй – с экспериментальными) объемом 10 литров с постоянной аэрацией.

Регистрацию ЧСС проводили непрерывно в течение 9 часов до воздействия и 5 часов после добавления хлорида никеля в аквариум с экспериментальными животными. Никель был добавлен на 541-й минуте. Использовалась концентрация в 500 мкг/л ионов никеля, что соответствует 25 ПДК. Выбор данной концентрации обусловлен использованием сходных концентраций металла (от 455 до 1126 мкг/л) в различных исследованиях [Watling, Watling, 1982; Stuijzand et al., 1995]. Добавление металла было выполнено однократно.

Запись сердечного ритма осуществлялась на два ПАК (один использовался для контрольной группы животных, второй – для экспериментальной). На графиках представлены средние значения ЧСС моллюсков в каждую минуту. Групповая дисперсия рассчитывалась для каждой минуты опыта по ЧСС используемых моллюсков. Индивидуальную дисперсию получали путем взятия 30 последовательных значений ЧСС у отдельной мидии и, соответственно, расчета дисперсии. Нормальность распределения определяли по методу Колмогорова – Смирнова. При сравнении ЧСС контрольной и экспериментальной групп применяли t-критерий Стьюдента.

### Результаты и обсуждение

До воздействия поллютантом средние ЧСС в экспериментальной и контрольной группах достоверно не различались между собой (22,3 и 22,2 уд/мин соответственно). После добавления никеля средние значения ЧСС моллюсков экспериментальной группы достоверно снижались через 1 минуту с последующим резким падением через 20 минут до 15 уд/мин (рис. 1). Наблюдаемая брадикардия отражает понижение уровня метаболизма животных. В случае с мидиями это связано прежде всего с классической реакцией моллюсков на неблагоприятное воздействие, а именно – изоляцией от окружающей среды путем закрывания створок раковины. При этом сердечная активность у некоторых особей падает до нулевой отметки. Далее наблюдались выраженные флуктуации сердечного ритма животных (рис. 1), что объясняется аperiодическим приоткрыванием створок раковины мидиями для тестирования окружающей воды. В среднем ЧСС экспериментальной группы животных была достоверно ниже сердечной активности контрольных мидий ( $t = -38,78$ ;  $p < 0,001$ ). Таким образом, мы наблюдали последующую реакцию моллюсков на экспериментальное загрязнение среды. Сходные результаты отмечались в работах с использованием Cu, Zn и As [Bamber, Depledge, 1997; Marchan et al., 1999; Curtis et al., 2000].

Анализ дисперсии ЧСС экспериментальных моллюсков показал, что групповая вариабельность сердечной активности резко возростала через 20 минут после воздействия, т. е. через тот же временной интервал, что и выраженная брадикардия (рис. 2). С другой стороны, индивидуальная дисперсия ЧСС повысилась у четырех моллюсков в 3–10 раз уже через одну минуту после добавления никеля (табл.). Можно предположить, что даже такого краткого временного интервала достаточно для реакции мидии на никель.

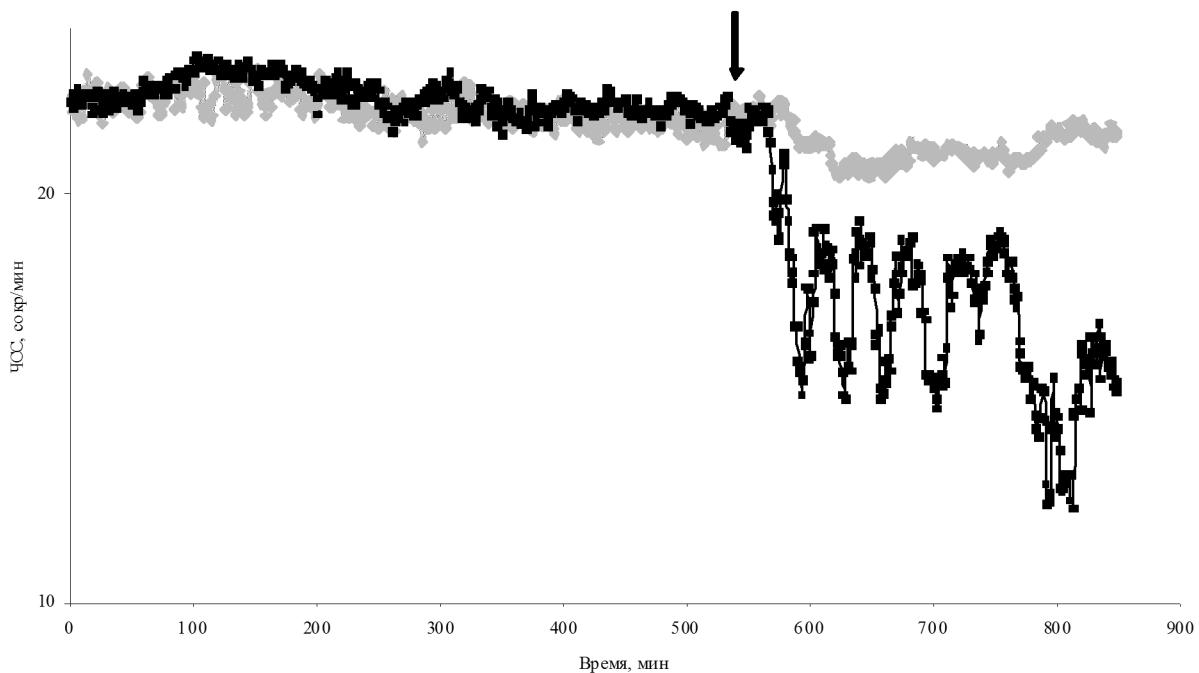


Рис. 1. ЧСС мидий контрольной и экспериментальной групп (серая и черная линии соответственно). Здесь и на рис. 2 черной стрелкой показан момент добавления никеля

Fig. 1. Heart rate of blue mussels of the control and experimental groups (grey and black lines, accordingly). Here and in Fig. 2 the black arrow shows the time of nickel addition

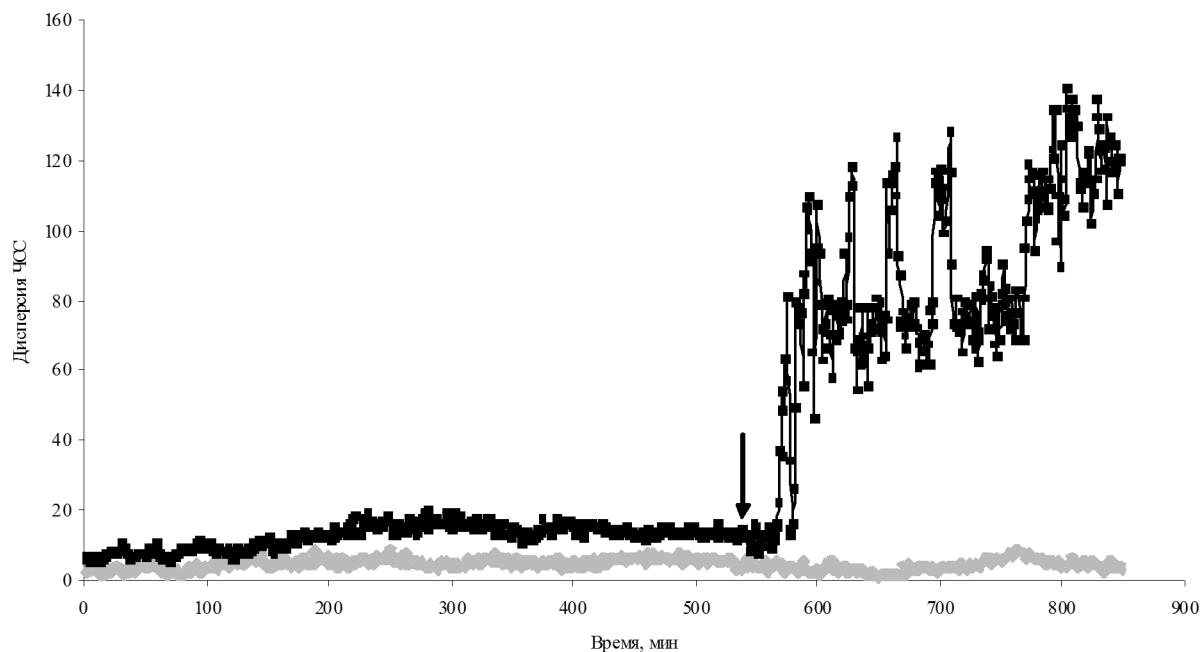


Рис. 2. Дисперсия ЧСС мидий контрольной и экспериментальной групп (серая и черная линии соответственно)

Fig. 2. Variance of the heart rate of blue mussels of the control and experimental groups (grey and black lines, accordingly)

Индивидуальные дисперсии ЧСС мидий до (0 мин) и после (1 мин) добавления никеля

Individual variance in the heart rate of blue mussels before (0 min) and after (1 min) nickel addition

Мидии экспериментальной группы Experimental group of blue mussels	0 мин 0 min	1 мин 1 min
1	0,31	0,95
2	0,55	0,55
3	1,66	1,98
4	0,15	0,17
5	0,28	2,11
6	0,15	1,58
7	0,45	1,47

Таким образом, показано, что никель в концентрации 500 мкг/л выражено воздействует на сердечную активность мидий. В работе установлено, что при исследовании реакции сердечной системы моллюсков на тяжелые металлы можно использовать три показателя: изменение ЧСС, индивидуальную и групповую дисперсию ЧСС. При этом именно индивидуальная дисперсия, по-видимому, может служить первичным ответом. Следует подчеркнуть, что именно благодаря новому прибору и оригинальному программному обеспечению, позволяющему осуществлять непрерывную регистрацию и анализ показателей сердечной активности, мы получили возможность рассчиты-

вать вышеуказанную индивидуальную дисперсию ЧСС.

Работа выполнялась с соблюдением всех международных, национальных и/или институциональных принципов гуманной этики при использовании лабораторных животных. Настоящая статья не содержит описания каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов.

Авторы благодарят сотрудников ББС ЗИН РАН «Картеш» за неоценимую помощь при сборе материала и постановке экспериментов.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт биологии КарНЦ РАН и ОКНИ КарНЦ РАН).

## Литература

Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 27 апреля 2003 г.).

Колючкина Г. А., Исмаилов А. Д. Морфо-функциональные особенности двустворчатых моллюсков при экспериментальном загрязнении среды тяжелыми металлами // Океанология. 2011. Т. 51(5). С. 857–866.

Anilkumar P., Meenakshi G. Ascorbate effect on protein content during nickel intoxication in the freshwater bivalve, *Lamellidens corrianus* // Biosc. Discov. 2012. Vol. 3(2). P. 270–274.

Aquatic effect assessment for nickel. Background report on the nickel – ion. Danish Environmental Protection Agency. 2002. 79 p. <http://www.biosciencediscovery.com> (дата обращения: 01.04.2020).

Azizi G., Akodad M., Baghour M., Layachi M., Moumen A. The use of *Mytilus* spp. mussels as bioindicators of heavy metal pollution in the coastal environment. A review // J. Mater. Environ. Sci. 2018. Vol. 9(4). P. 1170–1181. doi: 10.26872/jmes.2018.9.4.129

Bakhmet I. N., Kantserova N. P., Lysenko L. A., Nemova N. N. Effect of copper and cadmium ions on heart function and calpain activity in blue mussel *Mytilus edulis* // J. Environ. Sci. Health. A Tox. Hazard Subst. Environ. Eng. 2012. No. 47(12). P. 1528–1535. doi: 10.1080/10934529.2012.680393

Bamber S. D., Depledge M. H. Evaluation of changes in the adaptive physiology of shore crabs (*Carcinus maenas*) as an indicator of pollution in estuarine environments // Mar. Biol. 1997. No. 129. P. 667–672. doi: 10.1007/s002270050209

Burnett N. P., Seabra R., De Pirro M., Wethey D. S., Woodin S. A., Helmuth B., Zippay M. A., Sarà G., Monaco C., Lima F. P. An improved noninvasive method for measuring heartbeat of intertidal animals // Limnol. Oceanogr.: Meth. 2013. Vol. 11. P. 91–100. doi: 10.4319/lom.2013.11.91

Calabrese A., MacInnes J. R., Nelson D. A., Miller J. E. Survival and growth of bivalve larvae under heavy-metal stress // Mar. Biol. 1977. Vol. 41. P. 179–184. doi: 10.1007/BF00394024

Curtis T. M., Williamson R., Depledge M. H. Simultaneous, long-term monitoring of valve and cardiac activity in the blue mussel *Mytilus edulis* exposed to copper // Mar. Biol. 2000. Vol. 136(5). P. 0837–0846. doi: 10.1007/s002270000297

El-Sikaily A., Khaled A., El Nemr A. Heavy metals monitoring using bivalves from Mediterranean Sea and Red Sea // Env. Monit. Assess. 2004. Vol. 98. P. 41–58. doi: 10.1023/B:EMAS.0000038178.98985.5d

Gissi F., Stauber J. L., Binet M. T., Golding L. A., Adams M. S., Schlekot C. E., Garman E. R., Jolley D. F. A review of nickel toxicity to marine and estuarine tropical biota with particular reference to the South East Asian and Melanesian region // Environ. Poll. 2016. Vol. 218. P. 1308–1323. doi: 10.1016/j.envpol.2016.08.089

Kholodkevich S. V., Ivanov A. V., Kurakin A. S., Kornienko E. L., Fedotov V. P. Real time biomonitoring of surface water toxicity level at water supply stations // Environ. Bioind. 2008. Vol. 3. P. 23–34.

Marchan S., Davies M. S., Fleming S., Jones H. D. Effect of copper and zinc on the heart rate of the limpet *Patella vulgata* L. // J. Comp. Biochem. Physiol. 1999. A. Vol. 123. P. 89–93. doi: 10.1016/S1095-6433(99)00043-4

Molvær J., Knutzen J., Magnusson J., Rygg B., Skei J., Sørensen J. Klassifisering av miljøkvalitet i fjorder og kystfarvann. Veiledning. SFT veiledning 97: 03. 1997. 36 p. (На норвежском яз.)

Savinova T., Savinov V., Green N., Hovind H., Korneev O., Marasaev S., Kaminsky E., Alexeeva L., Konoplev A., Kochetkov A., Pasyukova E., Samsonov D., Markov V., Galaktionov K. Monitoring of hazardous substances in the coastal areas of the White Sea: harmonisation with OSPAR's Joint Monitoring and Assessment Programme (JAMP) – White Sea, 2006. Akvaplan-niva report. 2007. 70 p.

Stuijzand S. C., Kraak M. H. S., Wink Y. A., Davids C. Short-term effects of nickel on the filtration rate of the Zebra Mussel *Dreissena polymorpha* // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 1995. Vol. 54(3). P. 376–381. doi: 10.1007/BF00195108

USFDA. Guidance for industry and FDA: Letter to State Agricultural Directors, State Feed Control Officials, and Food, Feed, and Grain Trade Organizations. US Food and Drug Administration, Rockville, MD. 1993. URL: [www.fda.gov/Food/GuidanceComplianceRegulatoryInformation/GuidanceDocuments/NaturalToxins/ucm120184.htm](http://www.fda.gov/Food/GuidanceComplianceRegulatoryInformation/GuidanceDocuments/NaturalToxins/ucm120184.htm) (дата обращения: 01.04.2020).

Watling H. R., Watling R. J. Comparative effects of metals on the filterig rate of the brown mussel (*Perna perna*) // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 1982. Vol. 29. P. 651–657. doi: 10.1007/BF01606103

Поступила в редакцию 07.04.2020

## References

Gigienicheskie normativy GN 2.1.5.1315–03 “Pre-del’no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob’ektov khozyaistvenno-pit’evogo i kul’turno-bytovogo vodopol’zovaniya” (utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom RF 27 aprelya 2003 g.) [Hygienic regulations GN 2.1.5.1315–03 Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in water of water objects of drinking and cultural-domestic water use (approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on April 27, 2003)].

Kolyuchkina G. A., Ismailov A. D. Morfo-funktsional’nye osobennosti dvustvorchatykh mollyuskov pri eksperimental’nom zagryaznenii srede tyazhelymi metallami [Morpho-functional features of bivalve mollusks under experimental environmental pollution with heavy

metals]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 2011. Vol. 51(5). P. 857–866.

Anilkumar P., Meenakshi G. Ascorbate effect on protein content during nickel intoxication in the freshwater bivalve, *Lamellidens corrianus*. *Biosc. Discov.* 2012. Vol. 3(2). P. 270–274.

Aquatic effect assessment for nickel. Background report on the nickel-ion. Danish Environmental Protection Agency. 2002. 79 p. URL: <http://www.biosciencediscovery.com> (accessed: 01.04.2020).

Azizi G., Akodad M., Baghour M., Layachi M., Moumen A. The use of *Mytilus* spp. mussels as bioindicators of heavy metal pollution in the coastal environment. A review. *J. Mater. Environ. Sci.* 2018. Vol. 9(4). P. 1170–1181. doi: 10.26872/jmes.2018.9.4.129

Bakhmet I. N., Kantserova N. P., Lysenko L. A., Nemova N. N. Effect of copper and cadmium ions on heart function and calpain activity in blue mussel *Mytilus edulis*. *J. Environ. Sci. Health. A Tox. Hazard Subst. Environ. Eng.* 2012. No. 47(12). P. 1528–1535. doi: 10.1080/10934529.2012.680393

Bamber S. D., Depledge M. H. Evaluation of changes in the adaptive physiology of shore crabs (*Carcinus maenas*) as an indicator of pollution in estuarine environments. *Mar. Biol.* 1997. No. 129. P. 667–672. doi: 10.1007/s002270050209

Burnett N. P., Seabra R., De Pirro M., Wetthey D. S., Woodin S. A., Helmuth B., Zippay M. A., Sarà G., Monaco C., Lima F. P. An improved noninvasive method for measuring heartbeat of intertidal animals. *Limnol. Oceanogr.: Meth.* 2013. Vol. 11. P. 91–100. doi: 10.4319/lom.2013.11.91

Calabrese A., MacInnes J. R., Nelson D. A., Miller J. E. Survival and growth of bivalve larvae under heavy-metal stress. *Mar. Biol.* 1977. Vol. 41. P. 179–184. doi: 10.1007/BF00394024

Curtis T. M., Williamson R., Depledge M. H. Simultaneous, long-term monitoring of valve and cardiac activity in the blue mussel *Mytilus edulis* exposed to copper. *Mar. Biol.* 2000. Vol. 136(5). P. 0837–0846. doi: 10.1007/s002270000297

El-Sikaily A., Khaled A., El Nemr A. Heavy metals monitoring using bivalves from Mediterranean Sea and Red Sea. *Env. Monit. Assess.* 2004. Vol. 98. P. 41–58. doi: 10.1023/B:EMAS.0000038178.98985.5d

Gissi F., Stauber J. L., Binet M. T., Golding L. A., Adams M. S., Schlekat C. E., Garman E. R., Jolley D. F. A review of nickel toxicity to marine and estuarine tropical biota with particular reference to the South East Asian and Melanesian region. *Environ. Poll.* 2016. Vol. 218. P. 1308–1323. doi: 10.1016/j.envpol.2016.08.089

Kholodkevich S. V., Ivanov A. V., Kurakin A. S., Kornienko E. L., Fedotov V. P. Real time biomonitoring

of surface water toxicity level at water supply stations. *Environ. Bioind.* 2008. Vol. 3. P. 23–34.

Marchan S., Davies M. S., Fleming S., Jones H. D. Effect of copper and zinc on the heart rate of the limpet *Patella vulgata* L. *J. Comp. Biochem. Physiol. A.* 1999. Vol. 123. P. 89–93. doi: 10.1016/S1095-6433(99)00043-4

Molvær J., Knutzen J., Magnusson J., Rygg B., Skei J., Sørensen J. Klassifisering av miljøkvalitet i fjorder og kystfarvann. Veiledning [Classification of environmental quality in fjords and coastal waters. A guide]. SFT veiledning 97: 03. 1997. 36 p. (In Norwegian).

Savinova T., Savinov V., Green N., Hovind H., Korneev O., Marasaev S., Kaminsky E., Alexeeva L., Konoplev A., Kochetkov A., Pasyunkova E., Samsonov D., Markov V., Galaktionov K. Monitoring of hazardous substances in the coastal areas of the White Sea: harmonisation with OSPAR's Joint Monitoring and Assessment Programme (JAMP) – White Sea, 2006. Akvaplan-niva report. 2007. 70 p.

Stuijzand S. C., Kraak M. H. S., Wink Y. A., Davids C. Short-term effects of nickel on the filtration rate of the Zebra Mussel *Dreissena polymorpha*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 1995. Vol. 54(3). P. 376–381. doi: 10.1007/BF00195108

USFDA. Guidance for industry and FDA: Letter to State Agricultural Directors, State Feed Control Officials, and Food, Feed, and Grain Trade Organizations. US Food and Drug Administration, Rockville, MD. 1993. URL: [www.fda.gov/Food/GuidanceComplianceRegulatoryInformation/GuidanceDocuments/NaturalToxins/ucm120184.htm](http://www.fda.gov/Food/GuidanceComplianceRegulatoryInformation/GuidanceDocuments/NaturalToxins/ucm120184.htm) (accessed: 01.04.2020).

Watling H. R., Watling R. J. Comparative effects of metals on the filterig rate of the brown mussel (*Perna perna*). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 1982. Vol. 29. P. 651–657. doi: 10.1007/BF01606103

Received April 07, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Бахмет Игорь Николаевич

старший научный сотрудник лаб. экологии рыб и водных беспозвоночных, к. б. н.  
Институт биологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: igor.bakhmet@gmail.com  
тел.: +79114076436

### Екимов Дмитрий Анатольевич

научный сотрудник, к. т. н.  
Отдел комплексных научных исследований,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: edmitr2007@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### Bakhmet, Igor

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: igor.bakhmet@gmail.com  
tel.: +79114076436

### Ekimov, Dmitry

Department for Multidisciplinary Scientific Research,  
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: edmitr2007@mail.ru