

УДК 574:575.263

Н.А. Айздайчер¹, Ж.В. Маркина^{1, 2*}¹ Институт биологии моря им. А.В. Жирмунского ННЦМБ ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17;² Дальневосточный государственный федеральный университет,
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

**УСТОЙЧИВОСТЬ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ
DUNALIELLA SALINA И *PHAEODACTYLUM TRICORNUTUM*
К РАЗНОМУ СОДЕРЖАНИЮ СЕЛЕНА В СРЕДЕ**

Изучено влияние добавок селена в разных концентрациях (0,01; 0,10 и 0,50 мг/л) на динамику численности клеток и скорость роста двух видов микроводорослей *Dunaliella salina* (Chlorophyta) и *Phaeodactylum tricornutum* (Bacillariophyta). Однократное разовое добавление селена в начале опыта в исследуемых концентрациях не оказывало влияния на динамику численности и морфологию клеток *D. salina*. В том случае, когда селен добавляли через каждые двое суток после начала опыта, отмечали достоверные различия в численности клеток при содержании элемента 0,10 мг/л; при 0,01 и 0,50 мг/л численность клеток не отличалась от контроля. При ежедневном добавлении селена в дозе 0,50 мг/л через шесть суток численность клеток по сравнению с контролем уменьшалась. Клетки начинали разрушаться, оседать на дно сосуда, образовывать агрегаты. Изменялся цвет суспензии, которая приобретала желтоватый оттенок. Численность клеток *P. tricornutum* при добавлении селена в концентрации 0,10 и 0,50 мг/л достоверно увеличивалась по сравнению с контролем через восемь суток. Во второй серии опыта внесение селена в дозе 0,01 и 0,10 мг/л также приводило к достоверному повышению числа клеток, а при 0,50 мг/л отмечали замедление роста численности клеток. Ежедневное добавление селена в концентрации 0,50 мг/л достоверно ингибировало рост числа клеток *P. tricornutum* с четвертых суток и до конца опыта. При этом отмечали прилипание клеток к стенкам и дну сосуда.

Ключевые слова: селен, скорость роста, численность клеток, *Dunaliella salina*, *Phaeodactylum tricornutum*.

DOI: 10.26428/1606-9919-2018-195-201-208.

Aizdaicher N.A., Markina Zh.V. Tolerance of microalgae *Dunaliella salina* and *Phaeodactylum tricornutum* to various concentrations of selenium in the medium // Izv. TINRO. — 2018. — Vol. 195. — P. 201–208.

Cell number dynamics and growth rate of microalgae *Dunaliella salina* (Chlorophyta) and *Phaeodactylum tricornutum* (Bacillariophyta) are considered in dependence on selenium concentration in the medium. The concentrations 0.01, 0.10, and 0.50 mg/l were tested. One-time addition of selenium did not influence on the cell number and morphology of *D. salina*. Under repeatable addition of selenium (every 2 days), reliable differences in the cells number were detected for the concentration 0.10 mg/l only, but the concentrations 0.01 and 0.50 mg/l

* Айздайчер Нина Александровна, кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: aizdaicher@mail.ru; Маркина Жанна Васильевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, e-mail: zhannav@mail.ru.

Aizdaicher Nina A., Ph.D., assistant professor, senior researcher, e-mail: aizdaicher@mail.ru; Markina Zhanna V., Ph.D., researcher, e-mail: zhannav@mail.ru.

did not make any effect on the cells different from the control. Under frequent repeatable addition of selenium (every day), the concentration 0.50 mg/l caused a visible decreasing of the cell number in compare with the control sample — after 6 days the cells started to decay, settled to the flask bottom and aggregated, the suspension color turned to yellowish. Reaction of diatom *Phaeodactylum tricornutum* was more complicated. Its cell number increased significantly against the control under both one-time addition of selenium in the concentration of 0.10 and 0.50 mg/l or the repeatable addition in every 2 days in the concentration 0.01 and 0.10 mg/l. But more frequent (every day) addition of selenium in the concentration 0.50 mg/l caused inhibition of the cells growth and decreasing of their number against the control sample — after 4 days the cells adhesion to the flask bottom was detected, apparently because of their metabolism alteration.

Key words: selenium, growth rate, cell density, *Dunaliella salina*, *Phaeodactylum tricornutum*.

Введение

Селен является одним из наиболее важных микроэлементов и входит в состав антиоксидантной системы, в том числе и микроводорослей. Соединения селена непосредственно участвуют в синтезе глутатиона, что способствует увеличению антиоксидантного потенциала клеток (Винярская и др., 2014). Он, как биогенный элемент, имеет огромное значение для фототрофных организмов, так как принимает непосредственное участие в метаболизме, биофизических и энергетических процессах (Гмошинский и др., 2000; Terry et al., 2000). Селен крайне необходим всем живым организмам для активации иммунной системы (Chen et al., 2013). Интерес к изучению этого элемента в последние годы вызван его участием в защите организмов при различных стрессах путем детоксикации активных форм кислорода (Дедков, Мусатов, 2004; Tinggi, 2008; Araie, Shiraiwa, 2009; Panahi et al., 2016; Schiavon et al., 2017).

Известно, что водные растения способны аккумулировать селен в количествах, до 1150 раз превышающих его концентрации в воде (Ohlendorf, 2003; Капитальчук и др., 2013). В морской воде он связан с детритом и диспергированным органическим веществом (Nakaguchi et al., 2004; Иваненко, 2018). Известно, что микроводоросли активно участвуют в перераспределении форм селена в природных водах и определяют обеспеченность селеном организмов более высоких трофических уровней (Yang, Hu, 1996; Минюк, Дробецкая, 2000). Активное накопление селена микроводорослями может быть использовано для получения биологически активных веществ в лечебно-профилактических целях с терапевтическим эффектом. В зависимости от концентрации селена в среде он может быть не только полезным, но и токсичным для гидробионтов, ингибируя определенные этапы обмена веществ (Грубинко, 2012).

В открытых акваториях Атлантического и Тихого океанов содержание селена может варьировать от 10 до 1000 нг Se/л (Kai et al., 1993). В российских морях Дальнего Востока отмечены районы с повышенным содержанием этого элемента. Так, в донных осадках отдельных акваторий зал. Петра Великого Японского моря содержание селена изменяется от 0,28 до 0,38 мкг/г сухой биомассы. Высокие концентрации селена в зал. Петра Великого носят локальный характер и приурочены к донным отложениям в районах с повышенной техногенной нагрузкой — бухты Врангеля, Золотой Рог, юго-западная часть зал. Петра Великого у устья р. Туманной (Ковековдова и др., 2001; Лукьянова и др., 2006; Иваненко, 2018).

Значительное число видов микроводорослей широко используются в качестве корма при выращивании личинок и взрослых беспозвоночных животных. Кроме того, *Dunaliella salina* и *Phaeodactylum tricornutum* являются перспективными объектами современной биотехнологии при получении каротиноидов (Nishino et al., 2009).

Цель работы — описание влияния различных концентраций селена на рост альгологически чистых культур *Dunaliella salina* и *Phaeodactylum tricornutum*.

Материалы и методы

Объектом исследования служили морские одноклеточные микроводоросли *Dunaliella salina* Teod. (Chlorophyta) штамм MBRU_DS-85 и *Phaeodactylum tricornutum*

Bohlin (Bacillariophyta) штамм MBRU_PT-85), содержащиеся в ЦКП Ресурсная коллекция «Морской биобанк» Национального научного центра морской биологии ДВО РАН (<http://marbank.dvo.ru>).

Клетки *D. salina* — яйцевидной или овальной формы, подвижные за счет двух жгутиков, равных длине клетки или слегка превышающих ее. Размер клеток сильно варьирует и составляет 5,0–25,0 мкм в длину и 3,8–20,3 мкм в ширину. Клеточная оболочка представлена тонким эластичным перипластом (Масюк, 1973).

Одноклеточная водоросль *P. tricornutum* — неподвижная планктонная, размер клеток варьирует в пределах 3–4 мкм в ширину и 20–25 мкм в длину. При неблагоприятных условиях не образует покоящихся стадий. Клеточные стенки органические, за исключением нескольких кремниевых мостиков (Ricard, 1987).

Альгологически чистые культуры выращивали в жидкой питательной среде Гольдберга (Кабанова, 1961), приготовленной на основе фильтрованной и стерилизованной морской воды соленостью 32 ‰ при температуре 20 ± 2 °C. Соленость измеряли на электросолемере ГМ-65М. Освещение люминесцентными лампами составляло 3500 лк на поверхности колб при чередовании фотопериода 14 : 10 (день : ночь). Для засева использовали культуры, находящиеся в экспоненциальной стадии роста. Эксперимент проводили в 500-миллиметровых конических колбах Эрленмейера с объемом суспензии 200 мл в течение 10 сут в трехкратной повторности. Рост численности клеток контролировали каждые 2 сут путем подсчета в 2 камерах Горяева из каждой повторности, используя микроскоп Janamed 2. Скорость роста вычисляли по формуле (Brown et al., 1998)

$$\mu = (\ln N_t - \ln N_0) / (t_t - t_0),$$

где $\ln N_0$ и $\ln N_t$ — логарифмы численности клеток к моменту времени t_0 и t_t ; t — время, сут. Стартовая концентрация составляла $5 \cdot 10^4$ кл./мл.

Для приготовления маточного раствора селена использовали селенит натрия Na_2SeO_3 (производство фирмы «НеваРеактив», Россия, ГОСТ 6-09-1315-76), производя перерасчет на ионы Se^{+4} . Проводили 3 серии опытов:

первая серия — селен в концентрациях 0,01; 0,10 и 0,50 мг/л вносили разово в первый день опыта;

вторая серия — селен в тех же концентрациях вносили каждые двое суток после начала опыта;

третья серия — селен в концентрации 0,50 мг/л вносили ежедневно. Контролем во всех случаях служили водоросли, культивируемые в питательной среде без добавок селена.

Полученные результаты статистически обрабатывали в программе Excel. Достоверность различий оценивали по критерию Стьюдента, используя 5 %-ный уровень значимости ($p \leq 0,05$). В таблицах представлены средние арифметические значения и их стандартные отклонения.

Результаты и их обсуждение

Одноклеточная водоросль *D. salina* широко используется в рыбном хозяйстве в качестве корма при выращивании как лососевых рыб, так и личинок беспозвоночных животных в лабораторных исследованиях, а также при промышленном выращивании моллюсков и иглокожих, в биотехнологии для получения витаминов и каротиноидов (Borowitzka, 1997; Ладыгина, 2007, 2010; Кашенко 2010). В первой серии опытов показано, что при добавлении селена в среду разово в начале опыта численность клеток и скорость роста зеленой водоросли *D. salina* достоверно не отличались от значений в контроле (табл. 1).

Во второй серии опытов при внесении селена в среду в концентрации 0,01 и 0,50 мг/л через 2 сут после начала опыта отмечено значительное увеличение численности клеток и скорости роста *D. salina* до конца опыта. Максимальный рост наблюдался при внесении селена в концентрации 0,10 мг/л, когда скорость роста возрастала до 0,8 деления в сутки и численность клеток достоверно отличалась от значений в контроле с шестых суток после начала опыта.

Таблица 1

Динамика численности клеток ($N \cdot 10^4$) и скорость роста (μ) *D. salina* с добавками селена в среду

Table 1

Dunaliella salina cell number dynamics ($N \times 10^4$) and growth rate (μ) under selenium additions in the medium

Экспозиция, сут	Контроль	1			2			3
		Концентрация селена, мг/л						
		0,01	0,10	0,50	0,01	0,10	0,50	0,50
0	5,0 ± 0,3							
2	<u>25 ± 2</u> 1,6	<u>28 ± 3</u> 1,6	<u>27,0 ± 0,3</u> 1,6	<u>29,0 ± 0,4</u> 1,6	<u>29,0 ± 0,5</u> 1,6	<u>27,0 ± 0,3</u> 1,6	<u>31,0 ± 0,4</u> 1,7	<u>29,0 ± 0,3</u> 1,6
4	<u>108 ± 10</u> 0,6	<u>102 ± 9</u> 0,6	<u>101 ± 8</u> 0,6	<u>95 ± 7</u> 0,6	<u>140 ± 8</u> 0,7	<u>140 ± 10</u> 0,8	<u>125 ± 7</u> 0,6	<u>103 ± 12</u> 0,6
6	<u>279 ± 18</u> 0,5	<u>289 ± 17</u> 0,5	<u>294 ± 20</u> 0,5	<u>311 ± 22</u> 0,5	<u>326 ± 21</u> 0,6	<u>600 ± 19*</u> 0,7	<u>399 ± 17</u> 0,6	<u>189 ± 17*</u> 0,3
8	<u>406 ± 39</u> 0,2	<u>402 ± 29</u> 0,2	<u>422 ± 27</u> 0,1	<u>406 ± 23</u> 0,2	<u>490 ± 25</u> 0,1	<u>1090 ± 37*</u> 0,3	<u>483 ± 24</u> 0,2	<u>201 ± 21*</u> 0,1
10	<u>412 ± 40</u> 0	<u>438 ± 28</u> 0,1	<u>432 ± 24</u> 0,1	<u>412 ± 26</u> 0,1	<u>600 ± 23</u> 0,1	<u>1270 ± 39*</u> 0,1	<u>570 ± 16</u> 0,1	<u>151 ± 27</u> 0

Примечания. 1 — селен вносили разово в начале опыта; 2 — селен вносили через 2, 4, 6, 8 сут после начала опыта; 3 — селен вносили ежедневно. В числителе — численность клеток в единице объема, $N \cdot 10^4$; в знаменателе — скорость роста, μ (число делений/сут). * Значения, достоверно отличающиеся от контроля ($p \leq 0,05$).

В третьей серии опытов, когда селен в концентрации 0,50 мг/л вносили ежедневно, численность клеток не отличалась от значений в контроле в течение 4 сут. В дальнейшем рост значительно замедлялся, и скорость роста к восьмым суткам уменьшилась от 0,3 до 0,1 деления в сутки. Таким образом, рост *D. salina* зависит от концентрации селена в среде. Его высокие концентрации подавляли рост численности клеток, что, вероятно, приводило к изменению состава биохимических компонентов, необходимых для регуляторных процессов, и угнетению синтеза белка. Цвет суспензии приобретал желтоватый оттенок. В конце опыта рост водоросли прекращался, наблюдали отмирание клеток: они опускались на дно сосуда, образуя агрегаты. Формирование агрегатов при воздействии токсикантов характерно для микроводорослей (Новикова и др., 2008). Возможно, это связано с перестройкой их метаболизма, приводящей к усилению выделения слизи, способствующей слипанию клеток.

В опыте с *P. tricornutum* показано, что в первой серии при внесении селена в разных концентрациях максимальную скорость роста отмечали через 2 сут после начала опыта (табл. 2).

При увеличении экспозиции численность клеток продолжала возрастать и их максимальное количество, достоверно отличающееся от значений в контроле, зафиксировано при добавлении в среду селена в концентрации 0,10 и 0,50 мг/л через 8 и 10 сут. Во второй серии опытов максимальная скорость роста отмечена также через 2 сут при концентрации селена 0,01 и 0,10 мг/л, а при 0,50 мг/л наблюдали некоторое отставание в скорости роста и численности клеток, которое сохранялось до конца опыта. Через 8 и 10 сут численность клеток достоверно отличалась от значений в контроле. В третьей серии опыта через 4 сут скорость роста составляла только 0,6 деления в сутки, и тенденция к ее уменьшению сохранялась до конца опыта. Численность клеток достоверно отличалась от значений в контроле, и через 8 сут процесс деления клеток полностью прекращался.

Таким образом, добавление селена в концентрации 0,50 мг/л негативно сказывалось на жизнедеятельности двух видов микроводорослей, что более ярко было выражено при ежедневном внесении селена в среду за время эксперимента. Наши данные согласуются с результатами, полученными О.Н. Лукьяновой с соавторами (2006): по-

Таблица 2

Динамика численности клеток ($N \cdot 10^4$) и скорость роста (μ) *P. tricornutum* с добавками селена

Table 2

Phaeodactylum tricornutum cell number dynamics ($N \times 10^4$) and growth rate (μ) under selenium additions in the medium

Экспозиция, сут	Контроль	1			2			3
		Концентрация селена, мг/л						
		0,01	0,10	0,50	0,01	0,10	0,50	0,50
0	5,0 ± 0,5							
2	$\frac{52 \pm 6}{2}$	$\frac{50 \pm 6}{2}$	$\frac{51 \pm 5}{2}$	$\frac{52 \pm 6}{2}$	$\frac{55 \pm 4}{2}$	$\frac{51 \pm 4}{2}$	$\frac{50 \pm 3}{1,9}$	$\frac{49 \pm 6}{1,9}$
4	$\frac{347 \pm 35}{0,9}$	$\frac{319 \pm 30}{0,9}$	$\frac{319 \pm 31}{0,9}$	$\frac{329 \pm 30}{0,9}$	$\frac{395 \pm 30}{1}$	$\frac{382 \pm 31}{1}$	$\frac{290 \pm 30}{0,9}$	$\frac{195 \pm 40^*}{0,6}$
6	$\frac{799 \pm 75}{0,4}$	$\frac{912 \pm 90}{0,5}$	$\frac{879 \pm 80}{0,5}$	$\frac{900 \pm 75}{0,5}$	$\frac{896 \pm 80}{0,4}$	$\frac{925 \pm 61}{0,5}$	$\frac{710 \pm 55}{0,4}$	$\frac{363 \pm 62^*}{0,3}$
8	$\frac{1581 \pm 150}{0,3}$	$\frac{1618 \pm 170}{0,4}$	$\frac{1805 \pm 170^*}{0,4}$	$\frac{1870 \pm 200^*}{0,4}$	$\frac{1880 \pm 180^*}{0,4}$	$\frac{1899 \pm 180^*}{0,4}$	$\frac{1348 \pm 175}{0,3}$	$\frac{721 \pm 155^*}{0,3}$
10	$\frac{1990 \pm 250}{0,1}$	$\frac{1973 \pm 210}{0,1}$	$\frac{2247 \pm 210^*}{0,2}$	$\frac{2996 \pm 190^*}{0,2}$	$\frac{2997 \pm 240^*}{0,2}$	$\frac{2981 \pm 230^*}{0,2}$	$\frac{1512 \pm 225}{0,1}$	$\frac{794 \pm 160^*}{0}$

Примечание. Обозначения как в табл. 1.

стоянное увеличение концентрации селена в среде угнетало рост обеих водорослей и способствовало образованию агрегатов из клеток.

Потребность микроводорослей в селене зависит от видовых особенностей и колеблется от сотых долей миллиграмма до нескольких миллиграммов. Реакция водорослей на внесение в среду этого микроэлемента обусловлена его химической формой, концентрацией и продолжительностью воздействия. Степень ингибирования роста увеличивается, как показано, при действии высоких концентраций. Для жизнедеятельности микроводоросли предпочитают поглощать из среды соединения селенитов, а не селенатов, которые являются более агрессивными для них (Yang, Hu, 1996; Li et al., 2003). Отдельные виды водорослей проявляют высокую толерантность к селену. К ним можно отнести *Chlamydomonas reihardtii*, *Spirulina platensis* (Gojkovic et al., 2015; Khademi, Oraghi Ardebili, 2017).

Учитывая то, что концентрация селена 0,10 мг/л, при которой зафиксирован оптимальный рост двух видов микроводорослей, относящихся к разным систематическим группам, является достаточно высокой по сравнению с ПДК для рыбохозяйственных водоемов 0,001 мг/л (Беспамятнов, Коротов, 1985), полученные результаты свидетельствуют о значительной устойчивости этих видов к селену. Благодаря ценным пищевым качествам водорослей (большое содержание белков, жиров, аминокислот), отсутствию плотных клеточных оболочек и способности накапливать селен, они могут быть перспективными объектами для использования при изготовлении пищевых добавок, обогащенных селеном.

Выводы

Установлено, что разные концентрации селена при разовом внесении в начале опыта не сказывались на увеличении численности и скорости роста зеленой водоросли *D. salina*. Во второй серии опыта селен в концентрации 0,10 мг/л стимулировал рост численности клеток через 6 сут после начала культивирования, и она превышала показатели в контроле в 3 раза. Ежедневное внесение селена в дозе 0,50 мг/л способствовало ингибированию роста, и численность клеток в конце опыта была в 2,7 раза меньше, чем в контроле.

Для диатомовой водоросли *P. tricornutum* выявлено, что концентрация селена 0,01 мг/л в первой серии опыта не сказывалась на изменении численности клеток, в то время как более высокие концентрации — 0,10 и 0,50 мг/л — вызывали ее достоверное

увеличение через 8 сут. Такой же отклик зафиксирован и во второй серии опыта при добавлении 0,01 и 0,10 мг/л. Ежедневное внесение 0,50 мг/л в третьей серии опыта ингибировало рост водорослей начиная с четвертых суток.

Список литературы

- Беспамятнов Г.П., Коротов Ю.А.** Предельно-допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Справочник. — Л. : Химия, 1985. — 528 с.
- Винярская Г.Б., Боднар О.И., Станиславчук А.В., Грубинко В.В.** Антиоксидантная роль селенита натрия у *Chlorella vulgaris* Beij. (*Chlorophyta*) // Альгология. — 2014. — Т. 24, № 3. — С. 293–296.
- Гмошинский И.В., Мазо В.К., Тутьельян В.А., Хотимченко С.А.** Микроэлемент селен: роль в процессах жизнедеятельности // Экол. моря. — 2000. — Т. 54. — С. 5–19.
- Грубинко В.В.** Особенности адаптации одноклеточных пресноводных водорослей к тяжелым металлам // Актуальные проблемы современной альгологии : тез. докл. 4-й междунар. конф. — Киев : Ин-т ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины, 2012. — С. 83–85.
- Дедков Ю.М., Мусатов А.В.** Селен: биологическая роль, формы существования и методы определения // Экология промышленного производства. — 2004. — № 3. — С. 19–23.
- Иваненко Н.В.** Роль микроорганизмов в трансформации селена в морских водах // Биол. моря. — 2018. — Т. 44, № 2. — С. 73–79.
- Кабанова Ю.Г.** О культивировании в лабораторных условиях морских планктонных диатомовых и перидиниевых водорослей // Тр. ИОАН СССР. — 1961. — Т. 47. — С. 203–216.
- Капитальчук М.В., Голубкина Н.А., Шешнищан С.С., Капитальчук И.П.** Особенности аккумуляции селена растениями водных экосистем Молдавии // Вестн. МГОУ. Серия: Естественные науки. — 2013. — № 3. — С. 104–109.
- Кашенко С.Д.** Выращивание личинок донных морских беспозвоночных в лабораторных условиях (практические рекомендации). — Владивосток : Дальнаука, 2010. — 92 с.
- Ковековдова Л.Т., Иваненко Н.В., Симоконь М.В., Щеглов В.В.** Мышьяк и селен в промысловых гидробионтах прибрежных акваторий Приморья // Изв. ТИНРО. — 2001. — Т. 129. — С. 3–8.
- Ладыгина Л.В.** Каротиноидный состав микроводорослей — корма для двустворчатых моллюсков // Альгология. — 2010. — Т. 20, № 1. — С. 33–41.
- Ладыгина Л.В.** Микроводоросли как кормовые объекты личинок мидий и устриц : автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Севастополь, 2007. — 24 с.
- Лукьянова О.Н., Ковековдова Л.Т., Струппуль Н.Э., Иваненко Н.В.** Селен в морских организмах : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2006. — 151 с.
- Масюк Н.П.** Морфология, систематика, экология, географическое распространение рода *Dunaliella* Teod. и перспективы его практического использования : моногр. — Киев : Наук. думка, 1973. — 244 с.
- Минюк Г.С., Дробецкая И.В.** Влияние селена на жизнедеятельность морских и пресноводных микроводорослей (обзор) // Экол. моря. — 2000. — Т. 54. — С. 26–37.
- Новикова И.П., Паршикова Т.В., Власенко В.В., Зубенко И.Б.** Изменение функционального состояния клеток *Chlamydomonas reinhardtii* Dang. в присутствии бихромата калия в среде // Альгология. — 2008. — Т. 18, № 2. — С. 113–122.
- Araie H., Shiraiwa Y.** Selenium utilization strategy by microalgae // Molecules. — 2009. — Vol. 14, Iss. 12. — P. 4880–4891. DOI: 10.3390/molecules14124880.
- Borowitzka M.A.** Microalgae for aquaculture: opportunities and constraints // J. Apl. Phycol. — 1997. — Vol. 9. — P. 393–401.
- Brown M.R., McCausland M.A., Kowalski K.** The nutritional value of four Australian microalgal strains fed Pacific oyster *Crassostrea gigas* spat // Aquaculture. — 1998. — Vol. 165, Iss. 3–4. — P. 281–293.
- Chen Y.-C., Prabhu K.S., Mastro A.M.** Is selenium a potential treatment for cancer metastasis? // Nutrients. — 2013. — Vol. 5, Iss. 4. — P. 1149–1168. DOI: 10.3390/nu5041149.
- Gojkovic Ž., Garbayo I., Gómez-Ariza J.L. et al.** Selenium bioaccumulation and toxicity in cultures of green microalgae // Algal Res. — 2015. — Vol. 7. — P. 106–116.
- Kai N., Ueda T., Nagatomo K., Takeda Y.** The oxidation state and its distribution of selenium in the ocean — II. The vertical distribution of selenium in the Pacific Ocean and the Bay of Bengal // J. Nat. Fish. Univ. — 1993. — Vol. 41, Iss. 2. — P. 61–64.
- Khademi S., Oraghi Ardebili N.** Changes in antioxidant systems and biomass in response to selenate in blue-green microalgae *Spirulina platensis*, Cyanophyta // J. Plant. Proc. Func. — 2017. — Vol. 6, № 20. — P. 9–15.

Li Z.-Y., Guo S.-Y., Li L. Bioeffects of selenite on the grows of *Spirulina platensis* and its biotransformation // Biores. Techn. — 2003. — Vol. 89. — P. 171–176. DOI: 10.1016/S0960-8524(03)00041-5.

Nakaguchi Y., Takai M., Hattori H. et al. Dissolved selenium species in the Sulu Sea, the South China Sea and the Celebes Sea // Geochem. J. — 2004. — Vol. 38, Iss. 6. — P. 571–580. DOI: 10.2343/geochemj.38.571.

Nishino H., Murakoshi M., Tokuda H., Satomi Y. Cancer prevention by carotenoids // Arch. Biochem. Biophys. — 2009. — Vol. 483, Iss. 2. — P. 165–168. DOI: 10.1016/j.abb.2008.09.011.

Ohlendorf H.M. Ecotoxicology of selenium // Handbook of Ecotoxicology. — 2nd ed. — Boca Raton, L., N.Y., Washington, D.C. : CRC Press, 2003. — P. 465–500.

Panahi Y., Darvishi B., Jowzi N. et al. *Chlorella vulgaris*: a multifunctional dietary supplement with diverse medicinal properties // Curr. Pharm. Des. — 2016. — Vol. 22, Iss. 2. — P. 164–173. DOI: 10.2174/1381612822666151112145226.

Ricard M. Atlas du phytoplankton marin. Diatomophycées. — Paris : Centre National de la Recherche Scientifique, 1987. — Vol. 2. — 297 p.

Schiavon M., Ertani A., Parrasia S., Vecchia F.D. Selenium accumulation and metabolism in algae // Aquat. Toxicol. — 2017. — Vol. 189. — P. 1–8. DOI: 10.1016/j.aquatox.2017.05.011.

Terry N., Zayed A.M., de Souza M.P., Tarum A.S. Selenium in higher plants // Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. — 2000. — Vol. 51. — P. 401–432. DOI: 10.1146/annurev.arplant.51.1.401.

Tinggi U. Selenium: its role as antioxidant in human health // Environ. Health Prev. Med. — 2008. — Vol. 13, Iss. 2. — P. 102–108. DOI: 10.1007/s12199-007-0019-4.

Yang Y., Hu M. Uptake and transformation of selenium by marine phytoplankton // J. Appl. Oceanogr. — 1996. — Vol. 4. — P. 319–323.

References

Bespamyatnov, G.P. and Korotov, Yu.A., *Predel'no-dopustimye kontsentratsii khimicheskikh veshchestv v okruzhayushchei srede. Spravochnik* (Maximum Permissible Concentrations of Chemical Substances in the Environment. A Reference Book), Leningrad: Khimiya, 1985.

Vinyarskaya, G.B., Bodnar, O.I., Stanislavchuk, A.V., and Grubinko, V.V., The antioxidant role of sodium selenite in *Chlorella vulgaris* Beij. (*Chlorophyta*), *Al'gologiya*, 2014, vol. 24, no. 3, pp. 293–296.

Gmoshinski, I.V., Mazo, V.K., Tuteljan, V.A., and Hotimchenko, S.A., Selenium microelement: its role in vitality processes, *Ekol. Morya*, 2000, vol. 54, pp. 5–19.

Grubinko, V.V., Specifics of adaptation of unicellular freshwater algae to heavy metals, in *Tezisy dokl. 4 mezhdunar. konf. "Aktual'nye problemy sovremennoi al'gologii"* (Proc. 4th Int. Conf. "Actual Problems of Modern Algology"), Kiev: M.G. Kholodny Institute of Botany, NAS of Ukraine, 2012, pp. 83–85.

Dedkov, Yu.M. and Musatov, A.V., Selenium: biological role, forms of existence and methods of detection, *Ekol. Prom. Proizvodstva*, 2004, no. 3, pp. 19–23.

Ivanenko, N.V., The role of microorganisms in transformation of selenium in marine waters, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2018, vol. 44, no. 2, pp. 87–93.

Kabanova, Yu.G., On the cultivation of marine plankton diatoms and *Peridinium* algae under laboratory conditions, *Tr. Inst. Okeanol. Akad. Nauk SSSR*, 1961, vol. 47, pp. 203–216.

Kapitalchuk, M.V., Golubkina, N.A., Sheshnitsan, S.S., and Kapitalchuk, I.P., Features of selenium accumulation by the plants of freshwater ecosystems in Moldova, *Vestn. Mosk. Gos. Obl. Univ., Ser.: Estestv. Nauki*, 2013, no. 3, pp. 104–109.

Kashenko, S.D., *Vyrashchivanie lichinok donnykh morskikh bespozvonochnykh v laboratornykh usloviyakh (prakticheskie rekomendatsii)* (Rearing of Larvae of Benthic Marine Invertebrates under Laboratory Conditions (Practical Recommendations)), Vladivostok: Dal'nauka, 2010.

Kovekovdova, L.T., Ivanenko, N.V., Simokon, M.V., and Scheglov, V.V., Arsenic and selenium in commercial hydrobionts of coastal aquatories of Primorye, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2001, vol. 129, pp. 3–8.

Ladygina, L.V., *Karotinoidnyi sostav mikrovodoroslei — korma dlya dvustvorchatykh mol-luskov* (Carotenoid Composition of Microalgae, a Feed for Bivalve Mollusks), *Al'gologiya*, 2010, vol. 20, no. 1, pp. 33–41.

Ladygina, L.V., Microalgae as food objects for larval mussel and oyster, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Sevastopol, 2007.

Lukyanova, O.N., Kovekovdova, L.T., Struppul, N.E., Ivanenko N.V., *Selen v morskikh organizmakh* (Selenium in Marine Organisms), Shuntov, V.P., ed., Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2006.

Masyuk, N.P., *Morfologiya, sistematika, ekologiya, geograficheskoe rasprostranenie roda Dunaliella Teod. i perspektivy ego prakticheskogo ispol'zovaniya* (Morphology, Systematics, Ecology, and Geographical Distribution of the Genus *Dunaliella* Teod., and the Prospects of Its Practical Use), Kiev: Naukova Dumka, 1973.

Minyuk, G.S. and Drobetskaya, I.V., The effect of selenium on the activity of marine and freshwater microalgae (review), *Ekol. Morya.*, 2000, vol. 54, pp. 26–37.

Novikova, I.P., Parshikova, T.V., Vlasenko, V.V., and Zubenko, I.B., Change of the functional state of *Chlamydomonas reinhardtii* Dang. cells at the presence of $K_2Cr_2O_7$ in the environment, *Al'gologiya*, 2008, vol. 18, no. 2, pp. 113–122.

Araie, H. and Shiraiwa, Y., Selenium utilization strategy by microalgae, *Molecules*, 2009, vol. 14, no. 12, pp. 4880–4891. doi 10.3390/molecules14124880

Borowitzka, M.A., Microalgae for aquaculture: opportunities and constraints, *J. Appl. Phycol.*, 1997, vol. 9, pp. 393–401.

Brown, M.R., McCausland, M.A., and Kowalski, K., The nutritional value of four Australian microalgal strains fed Pacific oyster *Crassostrea gigas* spat, *Aquaculture*, 1998, vol. 165, no. 3–4, pp. 281–293.

Chen, Y.-C., Prabhu, K.S., and Mastro, A.M., Is selenium a potential treatment for cancer metastasis?, *Nutrients*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 1149–1168. doi 10.3390/nu5041149

Gojkovic, Ž., Garbayo, I., Gómez-Ariza, J.L., Márová, I., and Vilchez, C., Selenium bioaccumulation and toxicity in cultures of green microalgae, *Algal Res.*, 2015, vol. 7, pp. 106–116.

Kai, N., Ueda, T., Nagatomo, K., and Takeda, Y., The oxidation state and its distribution of selenium in the ocean — II. The vertical distribution of selenium in the Pacific Ocean and the Bay of Bengal, *J. Natl. Fish. Univ.*, 1993, vol. 41, no. 2, pp. 61–64.

Khademi, S., and Oraghi Ardebili, N., Changes in antioxidant systems and biomass in response to selenate in blue-green microalgae *Spirulina platensis*, Cyanophyta, *J. Plant Proc. Funct.*, 2017, vol. 6, no. 20, pp. 9–15.

Nakaguchi, Y., Takai, M., Hattori, H., Arii, Y., and Yamaguchi, Y., Dissolved selenium species in the Sulu Sea, the South China Sea and the Celebes Sea, *Geochem. J.*, 2004, vol. 38, no. 6, pp. 571–580. doi 10.2343/geochemj.38.571

Nishino, H., Murakoshi, M., Tokuda, H., and Satomi, Y., Cancer prevention by carotenoids, *Arch. Biochem. Biophys.*, 2009, vol. 483, no. 2, pp. 165–168. doi 10.1016/j.abb.2008.09.011

Ohlendorf, H.M., Ecotoxicology of selenium, *Handbook of Ecotoxicology*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2003, 2nd ed., pp. 465–500.

Panahi, Y., Darvishi, B., Jowzi, N., Beiragddar, F., and Sahebkar, A., *Chlorella vulgaris*: a multifunctional dietary supplement with diverse medicinal properties, *Curr. Pharm. Des.*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 164–173. doi 10.2174/1381612822666151112145226

Ricard, M., *Atlas du phytoplancton marin. Diatomophycées*, Paris: Centre National de la Recherche Scientifique, 1987, vol. 2.

Schiavon, M., Ertani, A., Parrasia, S., and Vecchia, F.D., Selenium accumulation and metabolism in algae, *Aquat. Toxicol.*, 2017, vol. 189, pp. 1–8. doi 10.1016/j.aquatox.2017.05.011

Terry, N., Zayed, A.M., de Souza, M.P., and Tarum, A.S., Selenium in higher plants, *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 2000, vol. 51, pp. 401–432. doi 10.1146/annurev.arplant.51.1.401

Tinggi, U., Selenium: its role as antioxidant in human health, *Environ. Health Prev. Med.*, 2008, vol. 13, no. 2, pp. 102–108. doi 10.1007/s12199-007-0019-4

Yang, Y. and Hu, M., Uptake and transformation of selenium by marine phytoplankton, *J. Appl. Oceanogr.*, 1996, vol. 4, pp. 319–323.

Li, Z.-Y., Guo, S.-Y., and Li, L., Bioeffects of selenite on the grows of *Spirulina platensis* and its biotransformation, *Bioresour. Technol.*, 2003, vol. 89, pp. 171–176. doi 10.1016/S0960-8524(03)00041-5

Поступила в редакцию 2.08.2018 г.

После доработки 15.08.2018 г.

Принята к публикации 11.10.2018 г.