



УДК 574.21, 574.64, 574.24, 504.064

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ АЗОВСКОГО МОРЯ МЕТОДОМ БИОТЕСТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ТЕСТОВ

© 2022 А. А. К. Аль-Раммахи^{1,2}, М. А. Сазыкина¹, Т. О. Барабашин^{1,3},
Ш. К. Карчава¹, М. В. Климова¹, М. И. Хаммами¹, И. С. Сазыкин¹

¹ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону 344090, Россия

²Технический университет им. Аль-Фурата Аль-Авсата, Наджаф 54003, Ирак

³Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),
Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону 344002, Россия

E-mail: ameer.iraq1982@gmail.com

Аннотация. Данное исследование направлено на оценку токсичности донных отложений Азовского моря. Были исследованы 32 образца донных отложений, отобранных в Таганрогском заливе, а также в Северном, Западном, Центральном, Южном и Восточном районах собственно моря. Для определения токсичности был использован метод биотестирования на основе цельноклеточных бактериальных lux-биосенсоров (*Vibrio aquamarinus* VKPM В-11245, *E. coli* MG1655 (pRecA-lux), *E. coli* MG1655 (pKatG-lux), *E. coli* MG1655 (pSoxS-lux)). Анализ токсичности донных отложений Азовского моря показал их масштабное загрязнение поллютантами различной природы. Интегральная токсичность зарегистрирована в донных отложениях всех исследованных станций Азовского моря. Уровень загрязнения донных отложений был оценен как высокотоксичный на 31 станции моря и как токсичный — на 1 станции. Обнаружено присутствие генотоксичных веществ — как прямых, так и промутагенных, — а также веществ, вызывающих окислительный стресс. Показано, что наиболее подвержены загрязнению Таганрогский залив, Центральный и Восточный районы Азовского моря. Выявлены максимально загрязненные станции отбора донных отложений. Интегральная токсичность и токсические эффекты, вызванные присутствием генотоксичных и прооксидантных веществ, свидетельствуют о постепенной аккумуляции поллютантов в донных отложениях Азовского моря и его неблагоприятном экологическом состоянии. Проведенное исследование позволило установить, что биотестирование с помощью цельноклеточных бактериальных люминесцентных сенсоров является многообещающим инструментом оценки экотоксикологического состояния исследуемого водоема. Показана необходимость дальнейших работ по выявлению токсикологически активных соединений в морских отложениях и определению потенциальных источников их происхождения.

Ключевые слова: Азовское море, загрязнение, токсичность, lux-биосенсоры

**ASSESSMENT OF THE POLLUTION OF THE BOTTOM SEDIMENTS
IN THE AZOV SEA BY BIOTESTING USING BIOLUMINESCENT TESTS****A. A. K. Al-Rammahi^{1,2}, M. A. Sazykina¹, T. O. Barabashin^{1,3},
Sh. K. Karchava¹, M. V. Klimova¹, M. I. Khammami¹, I. S. Sazykin¹**¹*FSAEI HE "Southern Federal University", Rostov-on-Don 344090, Russia*²*Al-Furat Al-Awsat Technical University, Najaf 54003, Iraq*³*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI "VNIRO"),
Azov-Black Sea Branch of the FSBSI "VNIRO" ("AzNIIRKH"), Rostov-on-Don 344002, Russia
E-mail: ameer.iraq1982@gmail.com*

Abstract. This study is aimed at the toxicity assessment of the bottom sediments in the Azov Sea. 32 samples of the bottom sediments, taken in Taganrog Bay, as well as in the Northern, Western, Central, Southern, and Eastern regions of the sea, have been investigated. A biotesting method based on whole-cell bacterial lux-biosensors (*Vibrio aquamarinus* VKPM B-11245, *E. coli* MG1655 (pRecA-lux), *E. coli* MG1655 (pKatG-lux), and *E. coli* MG1655 (pSoxS-lux)) was used to determine the toxicity level. Toxicity analysis of the Azov Sea bottom sediments showed their extensive contamination with pollutants of various nature. Integral toxicity was recorded for the surface sediments of all the investigated stations in the Azov Sea. The pollution level of the bottom sediments was estimated as highly toxic at 31 stations and as toxic at 1 station. The presence of genotoxic substances, both direct and promutagenic, was detected, as well as the presence of substances causing oxidative stress. It is shown that Taganrog Bay, the Central and Eastern regions of the Azov Sea are most exposed to pollution. The most polluted sampling stations for bottom sediments have been identified. Integral toxicity and the toxic effects caused by the presence of genotoxic and prooxidant substances indicate gradual accumulation of pollutants in the bottom sediments of the Azov Sea and its unfavorable environmental state. This study has established the biotesting method involving whole-cell bacterial luminescent sensors as a promising tool for the assessment of the ecotoxicological state of the investigated water body. It is deemed necessary to put further efforts into the identification of toxically active compounds in marine sediments and exploration of their possible sources.

Keywords: Azov Sea, pollution, toxicity, lux-biosensors

ВВЕДЕНИЕ

Азовское море является местом обитания многочисленной фауны и флоры, в т. ч. нагула и нереста экономически важных промысловых видов рыб, существенно влияя на жизнь людей в данном регионе и обеспечивая их качественной белковой пищей. Однако антропогенное загрязнение может негативно влиять на структуру и функции морской экосистемы, тем самым сокращая или уничтожая места обитания и источники продовольствия.

Деятельность человека в последние десятилетия усугубила загрязнение морских экосистем. В результате влияния промышленной и сельскохозяйственной деятельности они существенно деградировали. На протяжении многих лет загрязнители аккумулируются в донных отложениях (ДО) [1–3]. ДО являются конечным накопителем загрязняющих веществ морской среды и содержат сложные смеси известных и до сих пор

неизвестных опасных веществ. По этой причине, при возрастании уровня загрязнения, ДО становятся источником загрязнителей, которые за счет вторичного загрязнения могут далее передаваться в пищевые цепи водной среды [4]. Загрязняющие вещества могут оказывать прямое и косвенное воздействие на водные организмы. Оно может быть сублетальным или смертельным и заставляет организмы проявлять реакции, варьирующие от малозаметной адаптации до резких негативных ответных реакций [3, 5].

В последние несколько десятилетий растет интерес к использованию чувствительных биотестов для определения токсичности. Методы биологического анализа приобретают все большее значение и становятся важными элементами программ мониторинга окружающей среды. Применение батареи быстрых, чувствительных и экономичных биологических методов анализа токсичности является многообещающим комплексным

инструментом оценки качества окружающей среды. Биотестирование успешно используется в полевых исследованиях рек, лиманов, очистных сооружений и сточных морских вод [6].

Определение токсичности воды или ДО позволит установить взаимосвязи между загрязняющими веществами и экологическими последствиями. Мониторинг биологических эффектов необходимо использовать не только для выявления присутствия веществ или их комбинаций, которые ранее не были идентифицированы как представляющие опасность, но также и для выявления регионов с пониженным качеством окружающей среды или экосистем с ухудшившимся состоянием.

В связи с вышесказанным, целью нашей работы стало исследование загрязнения донных отложений Азовского моря методом биотестирования с помощью батареи цельноклеточных бактериальных люминесцентных сенсоров. Биолуми-

несцентные бактериальные сенсоры, в которых в качестве репортеров используются гены бактериальных люцифераз, удобны для оценки общей токсичности окружающей среды и ее загрязнения разнообразными поллютантами [7–9]. Использование батареи lux-биосенсоров дает возможность одновременно оценивать присутствие в экосистемах токсических веществ различной природы: ДНК-тропных соединений; веществ, вызывающих состояние окислительного стресса; тяжелых металлов и т. п.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ДО Азовского моря были отобраны в 2019 г. во время рейсов Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» с помощью дночерпателя Петерсена. Отбор ДО был проведен на 32 станциях моря (рис. 1).



Рис. 1. Карта-схема расположения станций для отбора проб ДО в Азовском море. Здесь и далее на рис. 2–6: № 1–8 — Таганрогский залив; № 9–12 — Северный район; № 13–15 — Западный район; № 16–21 — Центральный район; № 22–24 — Южный район; № 25–32 — Восточный район

Fig. 1. Outline map of the sampling stations for bottom sediments in the Azov Sea. Here and further in Fig. 2–6: No. 1–8 — Taganrog Bay; No. 9–12 — Northern region; No. 13–15 — Western region; No. 16–21 — Central region; No. 22–24 — Southern region; No. 25–32 — Eastern region

Для определения токсичности использовалась батарея люминесцентных штаммов. *Vibrio aquamarinus* VKPM В-11245 применяли в тесте для определения общей токсичности. Генноинженерные штаммы *E. coli* применялись для определения генотоксичных и прооксидантных веществ. Для детекции ДНК-тропных веществ использовали штамм *E. coli* MG1655 (pRecA-lux). Микросомальная фракция ферментов печени крыс S-9 (Moltox, USA) применялась в экспериментах для выявления промутагенных веществ. С целью обнаружения веществ, вызывающих окислительный стресс, применяли *E. coli* MG1655 (pKatG-lux) и *E. coli* MG1655 (pSoxS-lux). *E. coli* MG1655 (pKatG-lux) использовался для детекции образующихся пероксидов, *E. coli* MG1655 (pSoxS-lux) — для определения супероксид анион-радикала и NO. Для учета неспецифической биолюминесценции использовался *E. coli* MG1655 (pXen7), несущий конститутивный промотор. Подробный протокол биотестирования с помощью вышеуказанных штаммов и протокол приготовления экстрактов ДО приведены в работе [7].

Оценка токсичности

Токсическое влияние загрязнения на генноинженерные штаммы *E. coli* измеряли по индукции их биолюминесценции при 120-минутной экспозиции. Степень индукции люминесценции в морских ДО оценивали с помощью коэффициента индукции (I), рассчитываемого следующим образом:

$$I = \frac{L_c \times I_k}{L_k \times I_c}, \quad (1)$$

где L_c — интенсивность люминесценции суспензии биосенсора, содержащей тестируемый образец, L_k — интенсивность люминесценции контрольной суспензии lux-биосенсора, I_c — интенсивность люминесценции суспензии lux-штамма с конститутивным промотором (*E. coli* MG1655 (pXen7)) в присутствии испытуемого соединения, а I_k — интенсивность контрольной суспензии lux-штамма с конститутивным промотором (*E. coli* MG1655 (pXen7)). При статистически значимом ($p < 0,05$) отличии опыта от контроля $I < 2$ обнаруженный эффект оценивали как «слабый», при $2 \leq I \leq 10$ — как «средний» и при $10 < I$ — как «сильный».

Для определения интегральной токсичности рассчитывается индекс токсичности (Т):

$$T = 100 \cdot (I_k - I_c) / I_c, \quad (2)$$

где I_k и I_c — интенсивность люминесценции бактерий в контрольном и опытном образцах, соответственно (время экспозиции 30 мин.). Существует 3 пороговых уровня токсичности: допустимый ($T < 20$), токсичный ($20 \leq T < 50$) и высокотоксичный ($T \geq 50$). Все эксперименты проводились независимо три раза. Отличия от контроля считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Загрязнение морских экосистем токсическими элементами и соединениями антропогенного происхождения относится к числу основных опасностей для человека. Спектр таких загрязнений очень широк, а происхождение — разнообразно. Они попадают в водную среду в виде сложных смесей коммунально-бытовых, промышленных, транспортных или сельскохозяйственных стоков, смол и продуктов сгорания, нефтепродуктов, пестицидов и пр. [10]. Оценить последствия суммарного токсического воздействия таких комплексных смесей поллютантов можно только с помощью биоты. С этой целью для оценки интегральной токсичности ДО был использован биосенсор *Vibrio aquamarinus* VKPM В-11245. Результаты тестирования интегральной токсичности морских ДО представлены на рис. 2.

Во всех ДО Азовского моря, исследованных с помощью биосенсорного штамма *Vibrio aquamarinus* VKPM В-11245, зарегистрирована интегральная токсичность. Для 96,9 % ДО зарегистрирована высокая степень токсичности. В Таганрогском заливе, Центральном и Восточном районах в большинстве ДО индекс токсичности превышал 80. В ДО на станции № 8 Таганрогского залива величина индекса токсичности была максимальной и составила 94,67. Столь высокий уровень токсичности во всех исследованных образцах свидетельствует о значительном содержании поллютантов в ДО Азовского моря.

Следует отметить, что, несмотря на снижение концентраций тяжелых металлов и нефтепродуктов в донных отложениях в последние десятилетия, регулярно отмечаются локальные участки с повышенным уровнем загрязнения. И в первую очередь это касается акватории Таганрогского залива [11–13].

Необходимо отметить, что многие антропогенные поллютанты, такие как тяжелые металлы,

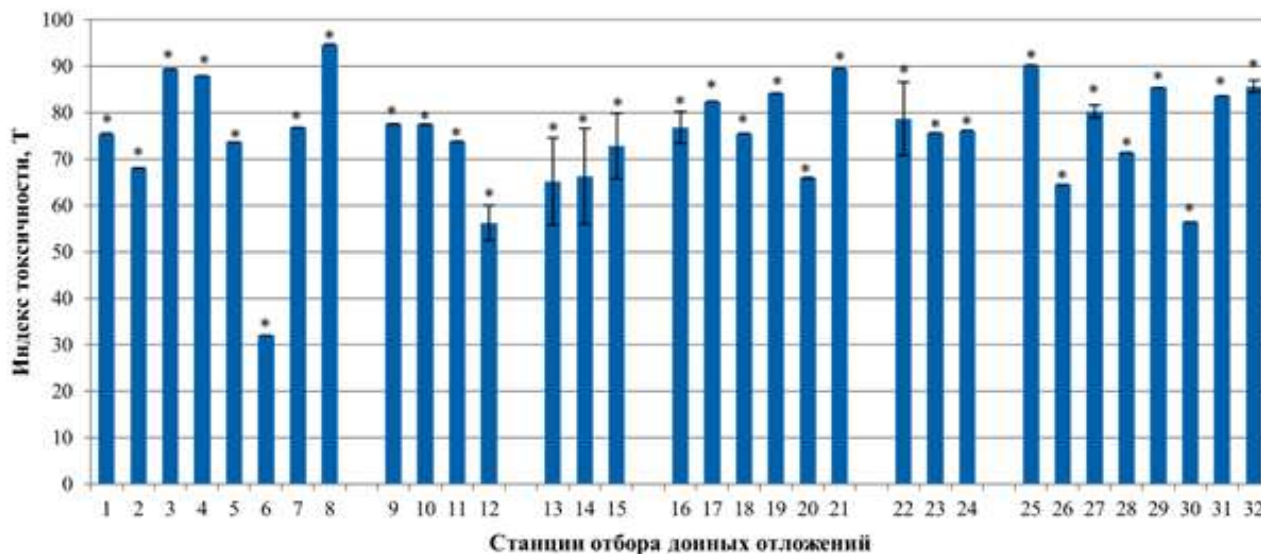


Рис. 2. Индукция люминесценции биосенсорного штамма *Vibrio aquamarinus* VKPM B-11245 в присутствии ДО Азовского моря. Различия статистически значимы при $p \leq 0,05$

Fig. 2. Luminescence induction of the biosensor strain *Vibrio aquamarinus* VKPM B-11245 in the presence of the bottom sediments from the Azov Sea. Differences are statistically significant at $p \leq 0.05$

полициклические ароматические углеводороды или полихлорированные бифенилы, зарегистрированы как потенциально генотоксичные и канцерогенные вещества. Они взаимодействуют с ДНК и ферментативными комплексами, вызывая формирование различных генетических нарушений. Если система восстановления ДНК дает сбой, сублетальное воздействие генотоксического соединения может привести к нестабильности генома. Повреждение ДНК приводит к нарушениям развития, гибели эмбрионов, наследственным мутациям и может напрямую влиять на структуру и размер популяции. Биоаккумуляция генотоксичных соединений через пищевую цепь может представлять непосредственную опасность для здоровья человека. Генетические нарушения способствуют дальнейшему снижению репродуктивного потенциала, снижению жизнеспособности населения и в долгосрочной перспективе могут привести к потере генетического разнообразия [14].

Генотоксичность является одним из важных специфических механизмов токсичности. В связи с этим она служит основой при экотоксикологической оценке риска, возникающего в присутствии веществ, модифицирующих ДНК организмов. Учитывая вышесказанное, на следующем этапе

исследований мы исследовали генотоксичность ДО Азовского моря. Полученные данные представлены на рис. 3 и 4.

Исследование генотоксичности ДО с биосенсором *E. coli* MG1655 (pRecA-lux) выявило присутствие прямых мутагенов в 75 % ДО, отобранных в разных районах Азовского моря (рис. 3). В основном во всех районах преобладали слабые генотоксические эффекты. Генотоксические эффекты средней величины обнаружены преимущественно в ДО, отобранных в Восточном районе (5 из 8 исследованных станций). На станции № 30 зарегистрирован максимальный уровень генотоксической активности ($I=2,98$).

На рис. 4 представлены результаты тестирования промутагенных веществ с использованием метаболической активации.

Как и в случае определения прямых мутагенов, биотестирование показало присутствие промутагенов в ДО всех районов моря. В целом промутагены обнаружены в 72 % ДО. Следует отметить, что в 34,4 % ДО зарегистрированы промутагенные эффекты средней величины. Факторы индукции максимальной величины зарегистрированы в ДО станций Северного (№ 11), Западного (№ 14) и Центрального (№ 16) районов (4,27; 4,58 и 7,65, соответственно).

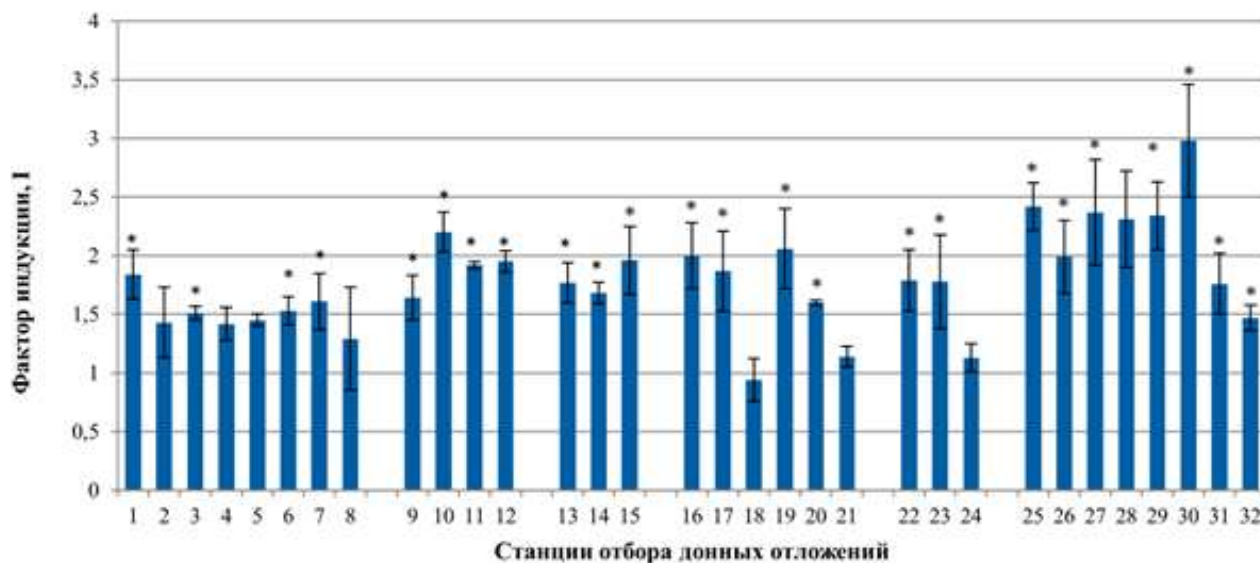


Рис. 3. Индукция люминесценции биосенсорного штамма *E. coli* MG1655 (pRecA-lux) в присутствии ДО Азовского моря. Различия статистически значимы при $p \leq 0,05$

Fig. 3. Luminescence induction of the biosensor strain *E. coli* MG1655 (pRecA-lux) in the presence of the bottom sediments from the Azov Sea. Differences are statistically significant at $p \leq 0.05$

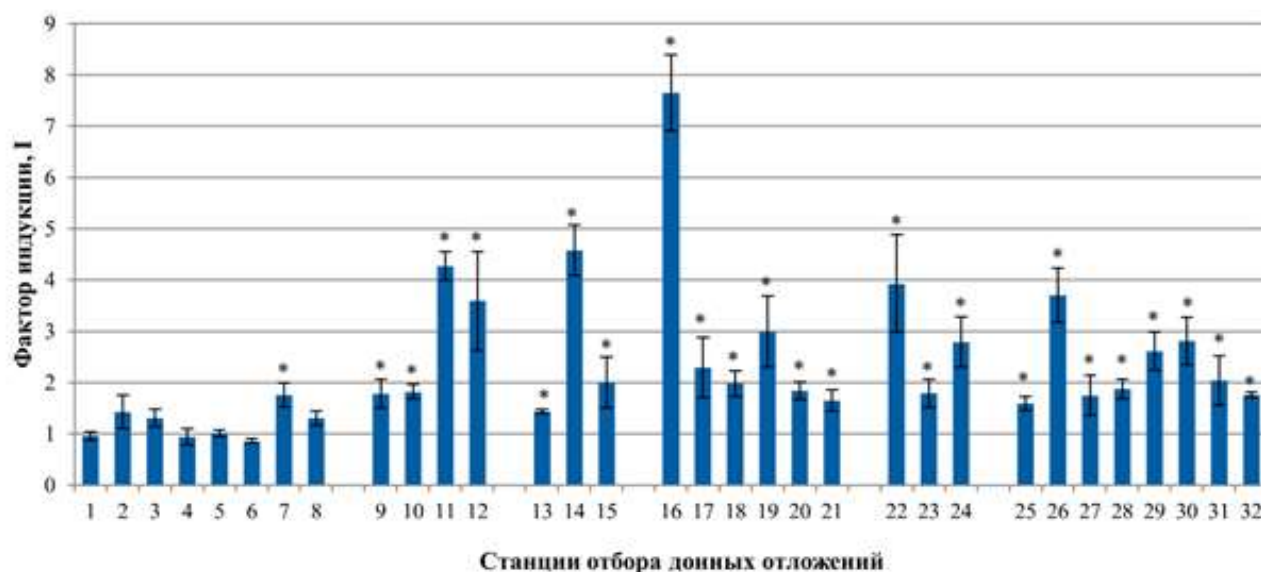


Рис. 4. Индукция люминесценции биосенсорного штамма *E. coli* MG1655 (pRecA-lux) с использованием метаболической активации в присутствии ДО Азовского моря. Различия статистически значимы при $p \leq 0,05$

Fig. 4. Luminescence induction of the biosensor strain *E. coli* MG1655 (pRecA-lux) with metabolic activation in the presence of the bottom sediments from the Azov Sea. Differences are statistically significant at $p \leq 0.05$

Полученные данные говорят о масштабном загрязнении Азовского моря генотоксическими веществами. И резервуаром генотоксичных загрязнителей, которые постоянно угрожают здоровью и жизнеспособности водной биоты, служат ДО. Загрязнение донных отложений токсическими

веществами, обладающими генотоксичностью для гидробионтов, было показано в работах многочисленных исследователей [15–17]. Поэтому сброс генотоксичных веществ следует контролировать, чтобы исключить постоянную угрозу водным экосистемам и здоровью человека.

Показатели окислительного стресса также полезны для оценки состояния водной среды [18]. Возникновению окислительного стресса способствует, например, воздействие токсичных металлов или ПАУ. Их накопление и токсичность вызывают выработку в морских организмах активных форм кислорода (АФК), ответственных за повреждение клеток и тканей. Воздействие прооксидантных веществ часто сопровождается активацией ряда немедленных физиологических адаптаций (например, гиперэкспрессии ферментативной антиоксидантной защиты) для предотвращения предполагаемых побочных эффектов АФК [19].

Для выявления прооксидантных веществ были использованы биосенсорные штаммы *E. coli* MG1655 (pKatG-lux) и *E. coli* MG1655 (pSoxS-lux). *E. coli* MG1655 (pKatG-lux) реагирует на присутствие в среде пероксидов. Индукция биолюминесценции была отмечена в 91 % ДО (рис. 5). В 41 % ДО зарегистрированы средние прооксидантные эффекты. В ДО, отобранных на станциях в Центральном (№ 18), Южном (№ 24) и Восточном (№ 30) районах, максимальные факторы индукции составили 4,05; 6,11; 8,87, соответственно. Ответная реакция биосенсора *E. coli* MG1655 (pSoxS-lux) отмечена в 81 % ДО (рис. 6). Данный штамм свидетельствует о присутствии в среде супероксид анион-радикала. Зарегистрированы как слабые, так и средние эффекты.

Эффекты средней величины были зарегистрированы в Таганрогском заливе, Центральном и Восточном районах моря. Среди сайтов с наиболее высокими факторами индукции биолюминесценции можно выделить станции отбора № 3, 18 и 30. Фактор индукции в ДО данных станций составил 3,4; 3,7 и 3,1, соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение батареи цельноклеточных бактериальных люминесцентных сенсоров позволило оценить пространственное загрязнение донных отложений Азовского моря. Результат профилирования токсичности ДО выявил присутствие токсических веществ различной природы в ДО всех исследованных районов Азовского моря. Показано, что наиболее загрязнены поллютантами Таганрогский залив, Центральный и Восточный районы Азовского моря. Необходимо проведение дальнейших исследований для полной долгосрочной оценки токсичности донных отложений Азовского моря.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 0852-2020-0029.

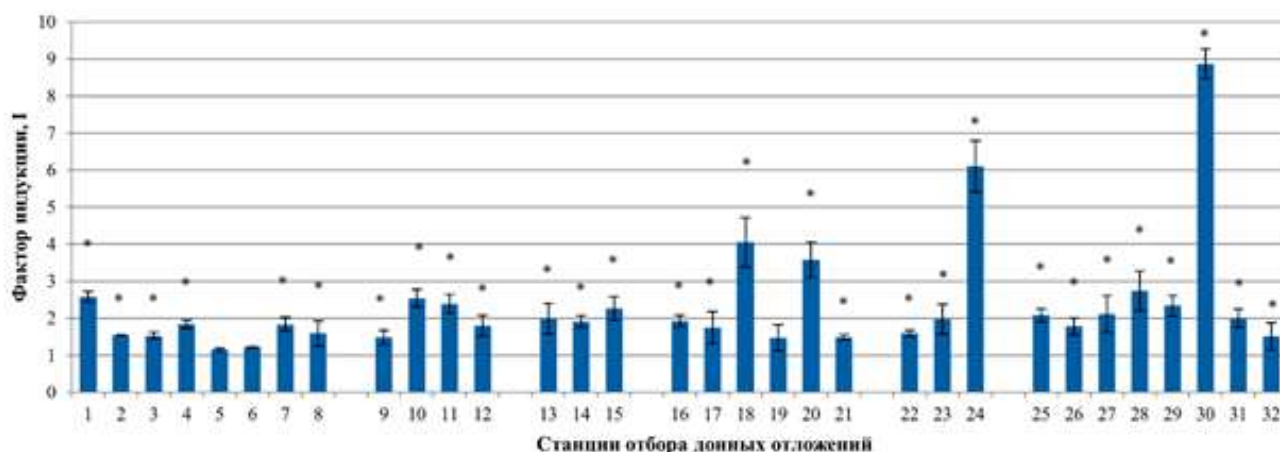


Рис. 5. Индукция люминесценции биосенсорного штамма *E. coli* MG1655 (pKatG-lux) в присутствии ДО Азовского моря. Различия статистически значимы при $p \leq 0,05$

Fig. 5. Luminescence induction of the biosensor strain *E. coli* MG1655 (pKatG-lux) in the presence of the bottom sediments from the Azov Sea. Differences are statistically significant at $p \leq 0.05$

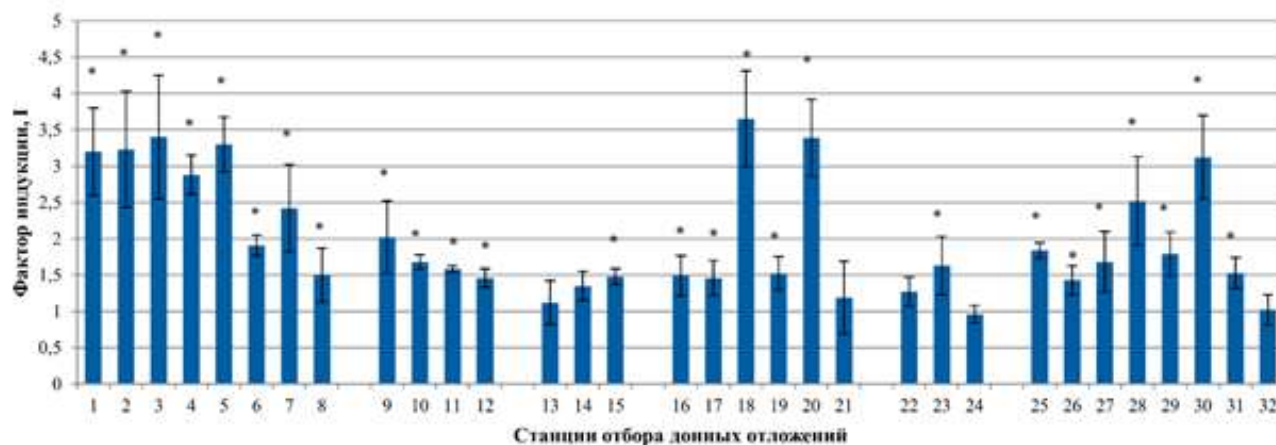


Рис. 6. Индукция люминесценции биосенсорного штамма *E. coli* MG1655 (pSoxS-lux) в присутствии ДО Азовского моря. Различия статистически значимы при $p \leq 0,05$

Fig. 6. Luminescence induction of the biosensor strain *E. coli* MG1655 (pSoxS-lux) in the presence of the bottom sediments from the Azov Sea. Differences are statistically significant at $p \leq 0.05$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Syvitski J.P., Cohen S., Miara A., Best J. River temperature and the thermal-dynamic transport of sediment // *Global and Planetary Change*. 2019. Vol. 178. Pp. 168–183. doi: 10.1016/j.gloplacha.2019.04.011.
2. Häder D.-P., Banaszak A.T., Villafañe V.E., Narvar-te M.A., González R.A., Helbling E.W. Anthropogenic pollution of aquatic ecosystems: Emerging problems with global implications // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 713. e136586. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136586.
3. Ma H., Pu S., Liu S., Bai Y., Mandal S., Xing B. Microplastics in aquatic environments: Toxicity to trigger ecological consequences // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 261. e114089. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114089.
4. Varol M., Kaçar E., Akın H.K. Accumulation of trace elements in muscle, gill and liver of fish species (*Capoeta umbla* and *Luciobarbus mystaceus*) in the Tigris River (Turkey), and health risk assessment // *Environmental Research*. 2020. Vol. 186. e109570. doi: 10.1016/j.envres.2020.109570.
5. Salgado L.D., Marques A.E.M.L., Kramer R.D., Garrido de Oliveira F., Moretto S.L., Alves de Lima B., Prodocimo M.M., Cestari M.M., Azevedo J.C.R., Silva de Assis H.C. Sediment contamination and toxic effects on Violet Goby fish (*Gobioides broussonnetii* — Gobiidae) from a marine protected area in South Atlantic // *Environmental Research*. 2021. Vol. 195. e110308. doi: 10.1016/j.envres.2020.110308.
6. Emelogu E.S., Pollard P., Robinson C.D., Smedes F., Webster L., Oliver I.W., McKenzie C., Seiler T.B., Hollert H., Moffat C.F. Investigating the significance of dissolved organic contaminants in aquatic environ-ments: Coupling passive sampling with *in vitro* bioas-says // *Chemosphere*. 2013. Vol. 90, no. 2. Pp. 210–219. doi: 10.1016/j.chemosphere.2012.06.041.
7. Sazykin I.S., Sazykina M.A., Khmelevtsova L.E., Mirina E.A., Kuddevskaya E.M., Rogulin E.A., Rakin A.V. Biosensor-based comparison of the eco-toxicological contamination of the wastewaters of Southern Russia and Southern Germany // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2016. Vol. 13, no. 3. Pp. 945–954. doi: 10.1007/s13762-016-0936-0.
8. Sazykin I.S., Minkina T.M., Khmelevtsova L.E., Antonenko E.M., Azhogina T.N., Dudnikova T.S., Sushkova S.N., Klimova M.V., Karchava S.K., Seliverstova E.Y., Kuddevskaya E.M., Konstanti-nova E.Y., Khammami M.I., Gnennaya N.V., Al-Rammahi A.A.K., Rakin A.V., Sazykina M.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons, antibiotic resis-tance genes, toxicity in the exposed to anthropogenic pressure soils of the Southern Russia // *Environmental Research*. 2021. Vol. 194. e110715. doi: 10.1016/j.envres.2021.110715.
9. Аль-Раммахи А.А.К., Сазыкина М.А., Бараба-шин Т.О., Климова М.В., Карчава Ш.К., Хамма-ми М.И., Сазыкин И.С. Оценка токсичности тканей пиленгаса при помощи цельноклеточных бактери-альных люминесцентных сенсоров // *Водные биоре-сурсы и среда обитания*. 2022. Т. 5, № 2. С. 34–42. doi: 10.47921/2619-1024_2022_5_2_34.
10. Rybakovas A., Arbačiauskas K., Markovskienė V., Jokšas K. Contamination and genotoxicity bio-marker responses in bivalve mussels from the major Lithuanian rivers // *Environmental and Molecular Mutagenesis*. 2019. Vol. 61, issue 3. Pp. 338–354. doi: 10.1002/em.22336.

11. Кораблина И.В., Севостьянова М.В., Барабашин Т.О., Геворкян Ж.В., Каталевский Н.И., Евсеева А.И. Тяжелые металлы в экосистеме Азовского моря // Вопросы рыболовства. 2018. Т. 19, № 4. С. 509–521.
12. Павленко Л.Ф., Скрыпник Г.В., Клименко Т.Л., Анохина Н.С., Экилик В.С., Севостьянова М.В., Барабашин Т.О. Многолетняя динамика нефтяного загрязнения среды обитания гидробионтов Азовского моря // Вопросы рыболовства. 2018. Т. 19, № 4. С. 534–544.
13. Барабашин Т.О., Рыжкова В.В., Савчук И.А. Нефтяное загрязнение воды и донных отложений Азовского моря в 2019 г. // Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование : матер. II Междунар. науч.-практ. конф. (г. Керчь, 27–30 мая 2020). Симферополь: Ариал, 2020. С. 260–263.
14. Villeneuve L.D., Garcia-Reyero N. Vision & strategy: Predictive eco-toxicology in the 21st century // Environmental Toxicology and Chemistry. 2011. Vol. 30, no. 1. Pp. 1–8. doi: 10.1002/etc.396.
15. Dieterich A., Gaete H. Assessment of the genotoxicity of sediment elutriates from an aquatic ecosystem on *Allium cepa*: Limache stream in central Chile // Environmental Monitoring and Assessment. 2021. Vol. 193, no. 5. e243. doi: 10.1007/s10661-021-09029-7.
16. Li Z., Feng C., Pang W., Tian C., Zhao Y. Nanoplastic-induced genotoxicity and intestinal damage in freshwater benthic clams (*Corbicula fluminea*): Comparison with microplastics // ACS Nano. 2021. Vol. 15, no. 6. Pp. 9469–9481. doi: 10.1021/acsnano.1c02407.
17. Guo X., Cai Y., Ma C., Han L., Yang Z. Combined toxicity of micro/nano scale polystyrene plastics and ciprofloxacin to *Corbicula fluminea* in freshwater sediments // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 789. e147887. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147887.
18. Nunes B., Paixão L., Nunes Z., Amado L., Ferreira M.A., Rocha R. Use of biochemical markers to quantify the toxicological effects of metals on the fish *Sciades herzbergii*: Potential use to assess the environmental status of Amazon estuaries // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. Pp. 30789–30799. doi: 10.1007/s11356-020-09362-3.
19. Vieira H.C., Bordalo M.D., Rodrigues A.C.M., Pires S.F.S., Rocha R.J.M., Soares A.M.V.M., Rendon von Osten J., Abreu S.N., Morgado F. Water temperature modulates mercury accumulation and oxidative stress status of common goby (*Pomatoschistus microps*) // Environmental Research. 2021. Vol. 193. e110585. doi: 10.1016/j.envres.2020.110585.
20. sediment. *Global and Planetary Change*, 2019, vol. 178, pp. 168–183. doi: 10.1016/j.gloplacha.2019.04.011.
2. Häder D.-P., Banaszak A.T., Villafañe V.E., Narvarte M.A., González R.A., Helbling E.W. Anthropogenic pollution of aquatic ecosystems: Emerging problems with global implications. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 713, e136586. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136586.
3. Ma H., Pu S., Liu S., Bai Y., Mandal S., Xing B. Microplastics in aquatic environments: Toxicity to trigger ecological consequences. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 261, e114089. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114089.
4. Varol M., Kaçar E., Akın H.K. Accumulation of trace elements in muscle, gill and liver of fish species (*Capoeta umbla* and *Luciobarbus mystaceus*) in the Tigris River (Turkey), and health risk assessment. *Environmental Research*, 2020, vol. 186, e109570. doi: 10.1016/j.envres.2020.109570.
5. Salgado L.D., Marques A.E.M.L., Kramer R.D., Garrido de Oliveira F., Moretto S.L., Alves de Lima B., Prodocimo M.M., Cestari M.M., Azevedo J.C.R., Silva de Assis H.C. Sediment contamination and toxic effects on Violet Goby fish (*Gobioides broussonnetii* — Gobiidae) from a marine protected area in South Atlantic. *Environmental Research*, 2021, vol. 195, e110308. doi: 10.1016/j.envres.2020.110308.
6. Emelogu E.S., Pollard P., Robinson C.D., Smedes F., Webster L., Oliver I.W., McKenzie C., Seiler T.B., Hollert H., Moffat C.F. Investigating the significance of dissolved organic contaminants in aquatic environments: Coupling passive sampling with *in vitro* bioassays. *Chemosphere*, 2013, vol. 90, no. 2, pp. 210–219. doi: 10.1016/j.chemosphere.2012.06.041.
7. Sazykin I.S., Sazykina M.A., Khmelevtsova L.E., Mirina E.A., Kudееvskaya E.M., Rogulin E.A., Rakin A.V. Biosensor-based comparison of the ecotoxicological contamination of the wastewaters of Southern Russia and Southern Germany. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, vol. 13, no. 3, pp. 945–954. doi: 10.1007/s13762-016-0936-0.
8. Sazykin I.S., Minkina T.M., Khmelevtsova L.E., Antonenko E.M., Azhogina T.N., Dudnikova T.S., Sushkova S.N., Klimova M.V., Karchava S.K., Seliverstova E.Y., Kudееvskaya E.M., Konstantinova E.Y., Khammami M.I., Gnennaya N.V., Al-Rammahi A.A.K., Rakin A.V., Sazykina M.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons, antibiotic resistance genes, toxicity in the exposed to anthropogenic pressure soils of the Southern Russia. *Environmental Research*, 2021, vol. 194, e110715. doi: 10.1016/j.envres.2021.110715.
9. Al-Rammahi A.A.K., Sazykina M.A., Barabashin T.O., Klimova M.V., Karchava Sh.K., Khammami M.I., Sazykin I.S. Otsenka toksichnosti tkaney pilengasa

REFERENCES

1. Syvitski J.P., Cohen S., Miara A., Best J. River temperature and the thermal-dynamic transport of

- pri pomoshchi tsel'nokletochnykh bakterial'nykh lyuminescentnykh sensorov [Evaluation of so-iuy mullet tissues toxicity using whole-cell bacterial luminescent sensors]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya* [*Aquatic Bioresources & Environment*], 2022, vol. 5, no. 2, pp. 34–42. doi: 10.47921/2619-1024_2022_5_2_34. (In Russian).
10. Rybakovas A., Arbačiauskas K., Markovskienė V., Jokšas K. Contamination and genotoxicity biomarker responses in bivalve mussels from the major Lithuanian rivers. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 2019, vol. 61, issue 3, pp. 338–354. doi: 10.1002/em.22336.
 11. Korablina I.V., Sevostyanova M.V., Barabashin T.O., Gevorkyan Zh.V., Katalevskiy N.I., Evseeva A.I. Tyazhelye metally v ekosisteme Azovskogo morya [Heavy metals in the ecosystem of the Azov Sea]. *Voprosy rybolovstva* [*Problems of Fisheries*], 2018, vol. 19, no. 4, pp. 509–521. (In Russian).
 12. Pavlenko L.F., Skrypnik G.V., Klimenko T.L., Anokhina N.S., Ekilik V.S., Sevostyanova M.V., Barabashin T.O. Mnogoletnyaya dinamika neftyanogo zagryazneniya sredy obitaniya gidrobiontov Azovskogo morya [Long-term dynamics of oil pollution of hydrobionts environment in the Azov Sea]. *Voprosy rybolovstva* [*Problems of Fisheries*], 2018, vol. 19, no. 4, pp. 534–544. (In Russian).
 13. Barabashin T.O., Ryzhkova V.V., Savchuk I.A. Neftyanoe zagryaznenie vody i donnykh otlozheniy Azovskogo morya v 2019 g. [Oil pollution water and bottom sediments of Azov Sea in 2019]. In: *Biologicheskoe raznoobrazie: izuchenie, sokhranenie, vosstanovlenie, ratsional'noe ispol'zovanie : materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Kerch', 27–30 maya 2020)* [*Biological diversity: study, conservation, restoration, and rational exploitation. Proceedings of the 2nd International Research and Practice Conference (Kerch, 27–30 May, 2020)*]. Simferopol: Arial, 2020, pp. 260–263. (In Russian).
 14. Villeneuve L.D., Garcia-Reyero N. Vision & strategy: Predictive eco-toxicology in the 21st century. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2011, vol. 30, no. 1, pp. 1–8. doi: 10.1002/etc.396.
 15. Dieterich A., Gaete H. Assessment of the genotoxicity of sediment elutriates from an aquatic ecosystem on *Allium cepa*: Limache stream in central Chile. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, vol. 193, no. 5, e243. doi: 10.1007/s10661-021-09029-7.
 16. Li Z., Feng C., Pang W., Tian C., Zhao Y. Nanoplastic-induced genotoxicity and intestinal damage in freshwater benthic clams (*Corbicula fluminea*): Comparison with microplastics. *ACS Nano*, 2021, vol. 15, no. 6, pp. 9469–9481. doi: 10.1021/acsnano.1c02407.
 17. Guo X., Cai Y., Ma C., Han L., Yang Z. Combined toxicity of micro/nano scale polystyrene plastics and ciprofloxacin to *Corbicula fluminea* in freshwater sediments. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 789, e147887. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147887.
 18. Nunes B., Paixão L., Nunes Z., Amado L., Ferreira M.A., Rocha R. Use of biochemical markers to quantify the toxicological effects of metals on the fish *Sciades herzbergii*: Potential use to assess the environmental status of Amazon estuaries. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 30789–30799. doi: 10.1007/s11356-020-09362-3.
 19. Vieira H.C., Bordalo M.D., Rodrigues A.C.M., Pires S.F.S., Rocha R.J.M., Soares A.M.V.M., Rendón von Osten J., Abreu S.N., Morgado F. Water temperature modulates mercury accumulation and oxidative stress status of common goby (*Pomatoschistus microps*). *Environmental Research*, 2021, vol. 193, e110585. doi: 10.1016/j.envres.2020.110585.

Поступила 05.07.2022

Принята к печати 14.07.2022