

## Оценка токсичности мазута для икры двух видов морских рыб

И. И. Руднева

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
e-mail: svg-41@mail.ru

### Аннотация

Шельфовые зоны морей и океанов, характеризующиеся высокой биопродуктивностью, в наибольшей степени подвержены антропогенному загрязнению, включая нефтяное. Ранние онтогенетические стадии гидробионтов очень чувствительны к действию загрязнителей, приводящих к возникновению окислительного стресса и развитию последующих патологических процессов. Исследовали влияние мазута в концентрации 0.01 и 0.1 мл/л на активность антиоксидантных ферментов, являющихся маркерами окислительного стресса, у эмбрионов собачки-павлина *Salaria pavo* и бычка-кругляка *Neogobius melanostomus* на VI этапе развития. В качестве биомаркеров спектрофотометрическими методами исследовали активность ключевых антиоксидантных ферментов супероксиддисмутазы (СОД), каталазы (КАТ), пероксидазы (ПЕР) и глутатионредуктазы (ГР). Результаты позволили выявить токсичность мазута, что выразилось в изменении активности тестируемых ферментов в эмбрионах обоих видов рыб, свидетельствующем о развитии окислительного стресса у развивающихся зародышей, инкубированных в растворах токсиканта. Установлены характерные общие закономерности и особенности ответных реакций ферментов эмбрионов на интоксикацию мазутом, зависящие от морфологического строения икринок исследуемых видов. Икринка собачки-павлина имеет более толстую внешнюю оболочку, чем у бычка-кругляка, и, следовательно, она лучше защищена от внешних воздействий. Обсуждается возможность использования демерсальной икры донных рыб в качестве тест-объектов для оценки экологического состояния прибрежных акваторий при нефтяном загрязнении.

**Ключевые слова:** Черное море, мазут, загрязнение, эмбрионы рыб, биомаркеры, антиоксидантные ферменты

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-44-920007 «Роль глобальных и локальных факторов в формировании ихтиопланктонных сообществ Черного моря». Автор выражает благодарность к. б. н. Т. Л. Чесалиной за разработку дизайна эксперимента.

**Для цитирования:** Руднева И. И. Оценка токсичности мазута для икры двух видов морских рыб // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 118–127. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-118-127

© Руднева И. И., 2022



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

# Assessment of Mazut Toxicity for Embryos of Two Sea Fish Species

I. I. Rudneva

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia  
e-mail: svg-41@mail.ru

## Abstract

Shelf areas of the seas and oceans characterizing high level of bioproductivity are significantly affected by anthropogenic pollution, including oil contamination. Early developmental stages of marine organisms are very sensitive to pollutants, which generate oxidative stress in them and provoke further pathological processes. We studied the influence of mazut in a concentration of 0.01 and 0.1 ml/L on the developing embryos of two benthic fish species: peacock blenny *Salaria pavo* and round goby *Neogobius melanostomus* in VI stage. We studied the following biomarkers: superoxidodismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (PER) and glutathione reductase (GR) spectrophotometrically. The results showed high toxicity of mazut accompanied with the changes in the activity of key antioxidant enzymes in the embryos of both tested fish species, which generated oxidative stress in developing fish exposed to mazut. The general trends and peculiarities of the responses of embryo enzymes to the oil intoxication were shown, which depended on the morphological peculiarities of eggs of the tested fish species. The peacock blenny egg has thicker shell than the round goby egg, therefore, it is protected better from the environmental impact. The paper discusses possibilities of use of the demersal fish eggs for the assessment of ecological status of shelf areas in case of oil pollution.

**Keywords:** Black Sea, mazut, pollution, fish embryos, biomarkers, antioxidant enzymes

**Acknowledgments:** this study was supported by the Russian Foundation of Basic Research (Project no. 18-44-920007 “The role of global and local factors in the formation of ichthyoplanktonic communities in the Black Sea”). The author is grateful to Dr. T.L. Chesalina for her help in experimental design development.

**For citation:** Rudneva, I.I., 2022. Assessment of Mazut Toxicity for Embryos of Two Sea Fish Species. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 118–127. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-118-127

## Введение

Экотоксикологические методы оценки действия разных загрязнителей являются признанными способами анализа состояния водных экосистем и их обитателей, поскольку имеют ряд достоинств, а именно: они не требуют дорогостоящего оборудования, являются оперативными и позволяют по откликам тест-организмов в течение достаточно короткого времени выявить неблагоприятные изменения в экосистемах. В связи с этим экотоксикологический подход нашел широкое применение в экологии и водной токсикологии. Он является неотъемлемой частью мониторинговых программ и используется при анализе экологического риска [1]. Важное значение имеет выбор тест-объектов, по реакциям которых можно судить о влиянии загрязнителей. Одной из информативных тест-систем являются эмбрионы и личинки рыб, которые чувствительны к действию разных поллютантов и в связи с этим широко применяются в практических целях для установления

нормативных уровней загрязнения среды и оценки состояния водной среды. Проведение теста на эмбриотоксичность поллютантов для рыб является обязательной составной частью методики<sup>1)</sup> определения предельно допустимой концентрации (ПДК) загрязняющих веществ для рыбохозяйственных водоемов, в том числе для морских акваторий, где ведется активная хозяйственная деятельность [2]. К ним относятся прежде всего шельфовые зоны морей и океанов, которые в наибольшей степени подвержены антропогенному влиянию, что негативно сказывается на экосистеме и ее обитателях.

Одним из наиболее распространенных и опасных загрязнителей морской среды по-прежнему является нефть и ее продукты [3, 4]. Увеличение объемов нефтедобычи на шельфе, а также разработка новых участков, в том числе в Черном море, неизбежно влечет за собой рост загрязнения морской среды нефтяными углеводородами, остатками буровых растворов и прочими сопутствующими поллютантами [5–7]. В их состав входят характеризующиеся разной токсичностью компоненты [7], которые по-разному влияют на гидробионтов. При этом шельф моря является наиболее продуктивной в биологическом отношении зоной, где происходит размножение и развитие (на ранних онтогенетических стадиях) организмов, для которых нефтяное загрязнение даже в самых небольших концентрациях представляет существенную опасность [8–11]. Исследователи отмечают проявление многообразных нарушений на разных стадиях биологической организации. Эти нарушения характеризуются задержкой роста и развития, ухудшением функций организма [12, 13], появлением аномалий, увеличением смертности и изменением времени вылупления личинок из икринок [14]. Все эти показатели могут служить удобными биоиндикаторами токсического влияния нефти на ранние онтогенетические стадии рыб, поэтому они широко применяются в водной токсикологии. Однако первичные токсические реакции разворачиваются на молекулярном уровне, и информативными биомаркерами в этом случае являются антиоксидантные ферменты, защищающие организм от окислительного стресса [15–18]. Отклики защитной антиоксидантной системы могут зависеть от вида рыб, стадии их развития и дозы токсиканта, что необходимо учитывать при планировании экотоксикологических экспериментов и мониторинговых программ, включая определение нормативных уровней содержания загрязнителей в морской среде.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ ответных реакций биомаркеров, в качестве которых анализировали активность четырех антиоксидантных ферментов икры собачки-павлина *Salaria pavo* и бычка-кругляка *Neogobius melanostomus* на VI этапе развития при инкубации в растворе мазута в концентрациях 0.01 и 0.1 мг/л.

---

<sup>1)</sup> Методические указания по разработке нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : утв. Приказом Росрыболовства от 04.08.2009 № 695. URL: [https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/documents/otraslevaya\\_deyatelnost/ohrana\\_vodnyh\\_bioresursovnnpa-4.pdf](https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/documents/otraslevaya_deyatelnost/ohrana_vodnyh_bioresursovnnpa-4.pdf) (дата обращения: 02.06.2022).

## Материал и методика

Икру бычка-кругляка *Neogobius melanostomus* и собачки-павлина *Salaria pavo* на VI этапе развития собирали в прибрежных водах Севастополя. Икра донная, эмбрионы развиваются в прибрежной зоне. VI этап – стадия подвижного эмбриона, для которой одновременно с пульсацией сердца характерно начало двигательной активности зародыша [19].

Мазут в концентрации 0.01 и 0.1 мл/л вносили в профильтрованную морскую воду и перемешивали 20–30 мин, отстаивали 30 мин и заливали в аэрируемые аквариумы. В них помещали икру в количестве 50 икринок при температуре воды, соответствующей температуре воды в море [20]. В аналогичных условиях содержали контрольную икру без нефтепродуктов. В конце VI этапа икру рыб отбирали для определения активности ферментов, которые проводили в трех повторностях.

Активность антиоксидантных ферментов супероксиддисмутазы (СОД), каталазы (КАТ), пероксидазы (ПЕР) и глутатионредуктазы (ГР) анализировали на спектрофотометре *Specol-211 (Carl Zeiss, Iena, Германия)* в соответствии с методами, описанными нами ранее [21]. Активность СОД выражали в условных единицах, активность КАТ – в миллиграммах  $H_2O_2$ . Активность ПЕР – в оптических единицах, активность ГР – в наномолях (нмоль) НАДФН. Все единицы активности ферментов рассчитывали на миллиграмм белка в минуту.

Результаты исследований обрабатывали статистически общепринятыми методами, вычисляли среднее арифметическое ( $M$ ) и ошибку среднего ( $m$ ). Достоверность различий определяли по критерию Манна – Уитни, различия считали достоверными при  $p < 0.05$ .

## Результаты

Результаты исследований позволили установить определенные закономерности и особенности изменения активности антиоксидантных ферментов развивающихся эмбрионов двух видов рыб при инкубации в растворе мазута при обеих концентрациях (таблица). При концентрации 0.01 мл/л активность СОД достоверно ( $p < 0.05$ ) снижалась на 83.5 % у эмбрионов собачки-павлина, но при повышении содержания токсиканта возрастала почти в три раза по сравнению с контролем (таблица, рис. 1). Для эмбрионов бычка-кругляка также отмечено падение активности фермента при обеих концентрациях мазута на 51–71 % (рис. 2).

Активность КАТ у эмбрионов собачки-павлина при низкой концентрации мазута увеличивалась почти на 140 %, а при высокой оставалась выше по отношению к контролю на 40 %. Для бычка-кругляка установлена иная зависимость: при концентрации 0.01 мл/л активность фермента не изменялась, а при концентрации 0.1 мл/л падала на 50 % (рис. 2).

Активность ПЕР у эмбрионов собачки-павлина при низкой концентрации мазута не изменялась, но возрастала на 150 % при повышении дозы токсиканта (рис. 1). У эмбрионов бычка-кругляка отмечено достоверное снижение активности фермента при обеих концентрациях мазута на 79–81 % (рис. 2). Под действием токсиканта активность ГР уменьшалась: у эмбрионов собачки-павлина на 38–53 % по отношению к контролю, а у эмбрионов бычка-кругляка – на 69–54 % соответственно (рис. 1).

Активность антиоксидантных ферментов (мг белка/мин,  $M \pm m$ ) эмбрионов собачки-павлина и бычка-кругляка на VI этапе развития, подвергнутых действию мазута в концентрации 0.01 и 0.1 мл/л

Antioxidant enzyme activity (mg protein/min,  $M \pm m$ ) in the peacock blenny and round goby embryos at development stage VI exposed to mazut at a concentration of 0.01 and 0.1 ml/L

Ферменты / Enzymes	Собачка-павлин / Peacock blenny		Бычок-кругляк / Round goby	
	0	0.01	0.1	0
	Концентрация мазута, % / Mazut concentration, %			
СОД / SOD	137.4 ± 18.6	22.2 ± 8.6	489.5 ± 28.3	150.8 ± 29.0
КАТ / CAT	0.05 ± 0.01	0.14* ± 0.08	0.07 ± 0.01	0.11 ± 0.01
ПЕР / PER	0.04 ± 0.003	0.040 ± 0.003	0.10 ± 0.02	0.44 ± 0.01
ГР / GR	4.35 ± 1.38	2.7* ± 0.8	2.04 ± 0.15	27.53* ± 1.50
				43.7 ± 8.6
				0.11 ± 0.01
				0.080 ± 0.005
				7.6 ± 0.9
				74.2 ± 12.3
				0.05 ± 0.01
				0.08 ± 0.01
				12.7 ± 1.5

Примечание: СОД – супероксиддисмутаза, КАТ – каталаза, ПЕР – пероксидаза, ГР – глутатионредуктаза.

Note: SOD – superoxide dismutase, CAT – catalase, PER – peroxidase, GR – glutathione reductase.

\* Различия достоверны при  $p < 0.05$  между значениями активности ферментов по отношению к контролю.

\* The differences are significant at  $p < 0.05$  between the enzyme activity to the control.

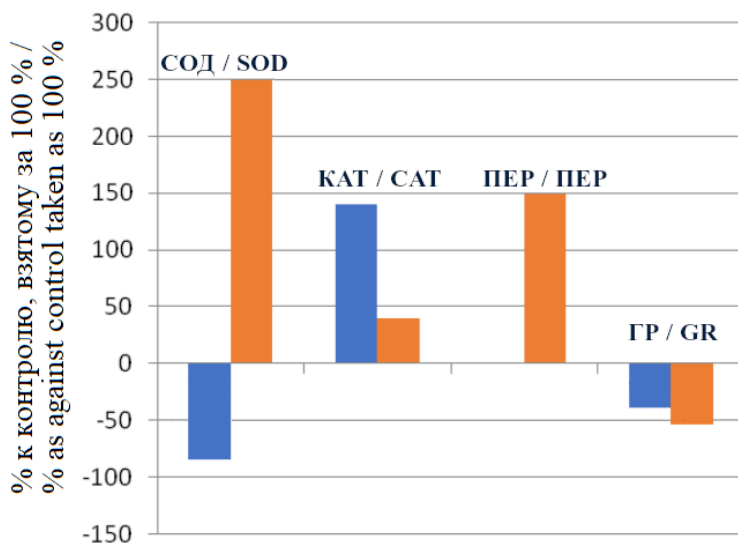


Рис. 1. Изменение активности антиоксидантных ферментов эмбрионов собачки-павлина под действием мазута по отношению к контролю, взятому за 100 % (синий цвет – концентрация мазута 0.01 мл/л; оранжевый – 0.1 мл/л)

Fig. 1. The changes of the antioxidant enzyme activity in the developing peacock blenny embryos exposed to mazut as against the control taken as 100 % (mazut concentration: blue – 0.01 ml/L; orange – 0.1 ml/L)

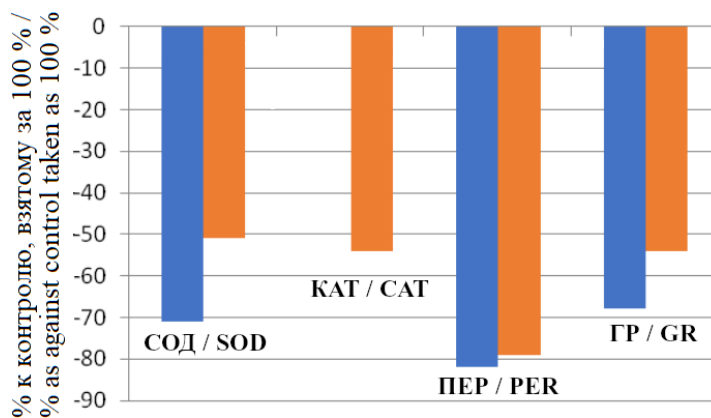


Рис. 2. Изменение активности антиоксидантных ферментов эмбрионов бычка-кругляка под действием мазута по отношению к контролю, взятому за 100 %. Остальные обозначения те же, что для рис. 1

Fig. 2. The changes of the antioxidant enzyme activity in the developing round goby embryos exposed to mazut as against the control taken as 100 %. The other nomenclatures are the same as for Fig. 1

### **Обсуждение результатов исследований**

Таким образом, результаты исследований показали определенные различия в откликах антиоксидантных ферментов эмбрионов двух видов рыб на действие мазута. При этом антиоксидантная система эмбрионов бычка-кругляка оказалась более чувствительной к действию мазута по сравнению с этой защитной системой собачки-павлина. Активность всех исследуемых ферментов эмбрионов бычка-кругляка под влиянием тестируемых концентраций мазута была снижена на 50–89 % по отношению к контролю, тогда как эти показатели собачки-павлина изменялись неоднозначно и зависели от дозы токсиканта. Так, активность СОД при инкубации эмбрионов собачки в растворе мазута с меньшей концентрацией снижалась, но при увеличении концентрации возрастала более чем в два раза по сравнению с контролем. Это свидетельствует о том, что при интоксикации мазутом развивается защитная реакция со стороны ключевого фермента антиоксидантной системы, конвертирующего супероксидрадикал до менее токсичных продуктов, в частности до перекиси водорода. Активность КАТ, разлагающей перекись водорода, под действием токсиканта у эмбрионов собачки-павлина повышалась на 40–145 % по отношению к контролю, что также свидетельствует о процессах детоксикации  $H_2O_2$  как защитной реакции зародышей на действие нефтепродуктов [22]. Такая же ответная реакция отмечена в отношении ПЕР, которая разлагает органические перекиси. При исследуемых концентрациях мазута активность ГР у эмбрионов собачки незначительно ингибировалась.

Полученные данные демонстрируют развитие окислительного стресса у эмбрионов двух видов рыб в ответ на действие мазута, что согласуется с результатами других авторов, которые показали, что нефть вызывает множественный стресс у гидробионтов, сопровождающийся усилением производства свободнорадикальной продукции, нарушением репродукции, повреждением ДНК, отклонениями в развитии и поведении, а также снижением иммунитета [23, 24].

Увеличение активности ферментов свидетельствует о формировании адаптивного ответа антиоксидантной системы эмбрионов для нейтрализации продуктов, образующихся в ходе свободнорадикальных реакций. Тогда как снижение активности ферментов обусловлено интоксикацией, вызывающей их ингибирование и приводящей к их неспособности выполнять защитные функции. Во всех случаях происходит отток энергии на антиоксидантную защиту, что снижает уровень метаболизма развивающегося эмбриона, ухудшает обеспечение нормальных процессов роста, развития и вылупления [17, 25]. Приведенные данные свидетельствуют об информативности параметров антиоксидантной системы для оценки токсических эффектов у гидробионтов при действии нефтяного загрязнения. В связи с этим они и были выбраны нами в качестве биомаркеров для анализа эмбриотоксичности мазута.

Наши исследования показали реорганизацию ферментной антиоксидантной системы развивающихся эмбрионов собачки-павлина и бычка-кругляка в зависимости от разных концентраций токсиканта. Как было от-

мечено ранее [16], перед выходом личинки из оболочка икринки, которая предохраняет ее от неблагоприятных воздействий внешней среды, происходит повышение активности антиоксидантных ферментов, что связано с обеспечением защиты организма от предстоящего окислительного стресса. Однако под действием тестируемых концентраций мазута в развивающейся икре рыб происходила модификация ответных реакций антиоксидантной защиты. При наличии токсиканта дополнительно необходимы затраты на процессы его детоксикации, что требует соответствующей реорганизации метаболизма.

Следует отметить видоспецифическую реакцию эмбрионов рыб на действие мазута, которая может быть обусловлена особенностями морфологического строения икринок. Толщина оболочка икринки бычка-кругляка составляет 4 мкм, собачки-павлина – 5 мкм [19]. Это означает, что икринка собачки-павлина защищена от внешних воздействий лучше, чем икринка бычка-кругляка, что согласуется с данными биохимических исследований. Кроме того, икринка бычка-кругляка (диаметр 1.9 мм) почти в два раза превосходит размеры икринки собачки-павлина (диаметр 0.75–0.80 мм). Большая поверхность икринки бычка способна адсорбировать больше токсиканта, который проникает внутрь и накапливается в развивающемся эмбрионе до концентраций, вызывающих интоксикацию организма и снижение его защитных реакций, выражающихся в ингибировании ферментов.

### **Заключение**

Результаты данного исследования демонстрируют эффективность применения молекулярных биомаркеров, которыми являются ферменты защитной антиоксидантной системы, для оценки состояния ранних стадий онтогенеза рыб, реагирующих на стрессор (нефть). При этом нами установлена видовая специфичность ответных реакций эмбрионов собачек и бычков на действие мазута, обусловленная специфическим строением икринок двух тестируемых видов. Икринка собачки-павлина защищена от внешних воздействий лучше, чем икринка бычка-кругляка, так как толщина ее оболочка больше, чем у бычка-кругляка (5 мкм и 4 мкм соответственно). Помимо этого, икринка бычка-кругляка почти в два раза превосходит размеры икринки собачки-павлина и, таким образом, способна адсорбировать больше токсиканта, проникающего внутрь и накапливающегося в развивающемся эмбрионе, что вызывает интоксикацию и снижение защитных реакций. Это необходимо учитывать при выборе тест-объектов и их биомаркеров в ходе разработки методов биотестирования и систем быстрого реагирования, а также выяснения механизмов адаптаций ранних онтогенетических стадий морских рыб к неблагоприятным условиям среды обитания.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Экотоксикологические исследования прибрежной черноморской ихтиофауны в районе Севастополя / ред. И. И. Руднева. М. : ГЕОС, 2016. 360 с.
2. *Мазманиди Н.* Экология рыб Черного моря и нефть. Батуми : Аджара, 1997. 147 с.



3. Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И. Прогноз циркуляционных процессов и распространения нефтяного загрязнения в восточной части Черного моря на основе региональной комплексной модели // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 3–15.
4. Ecological impacts of total petroleum hydrocarbons / S. Kuppusamy [et al.] // Total petroleum hydrocarbons. Cham : Springer, 2020. P. 95–138. doi:10.1007/978-3-030-24035-6
5. Патин С. А. Морской нефтегазовый комплекс: источники и факторы экологического риска // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 4. С. 5–12.
6. Human health risks from fish consumption following a catastrophic gas oil spill in the Chiquito River, Veracruz, Mexico / R. H. Adams [et al.] // Environmental Monitoring and Assessment. 2020. Vol. 192, iss. 12. 783. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08742-z>
7. Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review / J. Beyer [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2016. Vol. 110, iss. 1. P. 28–51. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.027>
8. Differences in biomarker and behavioral responses to native and chemically dispersed crude and refined fossil oils in zebrafish early life stages / S. Johann [et al.] // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 709. 136174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136174>
9. Impact of crude oil and the dispersant Corexit™ EC9500A on capelin (*Mallotus villosus*) embryo development / J. Beirão [et al.] // Marine Environmental Research. 2019. Vol. 147. P. 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.04.004>
10. Combined effects of crude oil exposure and warming on eggs and larvae of an arctic forage / M. L. Bender [et al.] // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. 8410. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87932-2>
11. Toxic effects of fluridone on early developmental stages of Japanese Medaka (*Oryzias latipes*) / J. Jin [et al.] // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 700. 134495. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134495>
12. Impacts of short-term salinity and turbidity stress on the embryonic stage of Red Sea bream *Pagrus major* / T. C. T. Phan [et al.] // Fisheries Science. 2020. Vol. 86, iss. 1. P. 119–125. <https://doi.org/10.1007/s12562-019-01368-2>
13. A guide to toxicity assessment and monitoring effects at lower levels of biological organization following marine oil spills in European waters. – ICES / C. Martínez-Gómez [et al.] // ICES Journal of Marine Science, 2010. Vol. 67. P. 1105–1118. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsq017>
14. Incardona J. P., Linbo T. L., Scholz N. L. Cardiac toxicity of 5-ring polycyclic aromatic hydrocarbons is differentially dependent on the aryl hydrocarbon receptor 2 isoform during zebrafish development // Toxicology and Applied Pharmacology. 2011. Vol. 257. P. 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2011.09.010>
15. Samuelsen A., Daewel U., Wettre C. Risk of oil contamination of fish eggs and larvae under different oceanic and weather conditions // ICES Journal of Marine Science. 2019. Vol. 76, iss. 6. P. 1902–1916. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz035>
16. Rudneva I. I. Biomarkers for stress in fish embryos and larvae. Boca Raton : CRC Press, 2013. 206 p. <https://doi.org/10.1201/b15378>
17. First evidence of marine diesel effects on biomarker responses in the Icelandic scallops, *Chlamys islandica* / P. Geraudie [et al.] // Environmental Science and

Pollution Research. 2016. Vol. 23. P. 16504–16512. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6572-x>

18. Oxidative stress in shellfish *Sinonovacula constricta* exposed to the water accommodated fraction of zero sulfur diesel oil and pinghu crude oil / M. Jiang [et al.] // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2017. Vol. 73, iss. 2. P. 294–300. <https://doi.org/10.1007/s00244-017-0391-z>
19. Дехник Т. В. Ихтиопланктон Черного моря. Киев : Наукова думка, 1973. 235 с.
20. Чесалина Т. Л., Руднева И. И., Кузьминова Н. С. Токсическое действие соляра на молодь черноморской кефали-остроноса *Liza saliens* // Вопросы ихтиологии. 2000. Т. 40, № 3. С. 429–432.
21. Rudneva I. I. Use of fish embryo biomarkers for the evaluation of mazut toxicity in marine environment // International Aquatic Research. 2019. Vol. 11, iss. 2. P. 147–157. <https://doi.org/10.1007/s40071-019-0225-x>
22. Lushchak V. I., Storey K. B. Oxidative stress concept updated: Definitions, classifications, and regulatory pathways implicated // EXCLI Journal. 2021. Vol. 20. P. 956–967. <https://doi.org/10.17179/excli2021-3596>
23. Monitoring biomarkers in fish (*Lepidorhombus boscii* and *Callionymus lyra*) from the northern Iberian shelf after the *Prestige* oil spill / C. Martínez-Gómez [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2006. Vol. 53, iss. 5–7. P. 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.03.010>
24. 0# Diesel water-accommodated fraction induced lipid homeostasis alteration in zebrafish embryos / X. Mu [et al.] // Environmental Pollution. 2018. Vol. 242. Part A. P. 952–961. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.055>
25. Multitissue molecular, genomic, and developmental effects of the deepwater horizon oil spill on resident gulf killifish (*Fundulus grandis*) / B. Dubansky [et al.] // Environmental Science and Technology. 2013. Vol. 47, iss. 10. P. 5074–5082. <https://doi.org/10.1021/es400458p>

Поступила 24.02.2021 г.; принята к публикации 27.04.2022 г.;  
опубликована 25.06.2022 г.

*Об авторе:*

**Руднева Ирина Ивановна**, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор биологических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-9623-9467**, **ResearcherID: L-3758-2016**, **SPIN-код: 9817-2796**, **AuthorID: 423419**, [svg-41@mail.ru](mailto:svg-41@mail.ru)

*About the author:*

**Irina I. Rudneva**, Leading Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Biol.), Professor, **ORCID ID: 0000-0002-9623-9467**, **ResearcherID: L-3758-2016**, **SPIN-code: 9817-2796**, **AuthorID: 423419**, [svg-41@mail.ru](mailto:svg-41@mail.ru)

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

*The author has read and approved the final manuscript.*