

**БИОХИМИЯ, ГЕНЕТИКА
И МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ****BIOCHEMISTRY, GENETICS
AND MOLECULAR BIOLOGY**

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-6-1-1334

EDN: NPDHVL

УДК 574.24



Научная статья

**ОЦЕНКА ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ
И МАРКЕРА ОКСИДАТИВНОГО СТРЕССА
У БЫЧКА-ПЕСОЧНИКА (*NEOGOBIUS FLUVIATILIS*),
ОБИТАЮЩЕГО В СЕВЕРНОМ КАСПИИ***Т.В. Кузина, А.В. Кузин***Аннотация**

Обоснование. В настоящее время изменение окружающей среды при нефтегазодобыче на Северном Каспии контролируется при проведении локального экологического мониторинга, обязательность которого определена Федеральными нормами и правилам. Среди маркеров оценки состояния гидробионтов выделяют биохимические и цитогенетические.

Цель. Оценка цитогенетических показателей и маркера оксидативного стресса у бычка-песочника, отловленного в местах ликвидированных скважин ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть».

Материалы и методы. Исследование проведено на 308 экземплярах рыб. Цитогенетические нарушения исследовали микроядерным тестом. Интенсивность ПОЛ в тканях печени оценивали по уровню накопления МДА. Результаты обработаны статистически с помощью программ «Microsoft Office Excel 2007».

Результаты. Средняя частота встречаемости эритроцитов с микроядрами у рыб на отдельных участках превышала уровень при спонтанном мутагенезе, и составляла 0,25%. Отмечали повышенное содержание МДА в гепатоцитах. Проведенный анализ между показателями оксидативного стресса и количе-

ством микроядер позволяет сделать вывод, что образование микроядер после воздействия свободных радикалов может являться адаптивной реакцией на данный стрессовый фактор в условиях обитания.

Заключение. Полученные результаты биохимического и цитогенетического исследования свидетельствуют о наличии у рыб двух одновременно протекающих патологических процессов. С одной стороны, повышение интенсивности процессов свободнорадикального окисления, с другой, нестабильность генома с повышенным числом цитогенетических перестроек. Следовательно, дестабилизация генома происходит на фоне активации свободнорадикальных процессов, и в условиях повышения уровня МДА более 65 нмоль значительно возрастает мутагенное действие свободных радикалов на геном.

Ключевые слова: МДА; микроядра; эритроциты; окислительный стресс; генетический мониторинг

Для цитирования. Кузина, Т. В., & Кузин, А. В. (2025). Оценка цитогенетического показателя и маркера оксидативного стресса у бычка-песочника (*Neogobius fluviatilis*), обитающего в Северном Каспии. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(6-1), 217-229. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-6-1-1334>

Original article

ASSESSMENT OF CYTOGENETIC INDEX AND MARKER OF OXIDATIVE STRESS IN A MONKEY GOBY (*NEOGOBIUS FLUVIATILIS*) NATIVE TO THE NORTHERN CASPIAN SEA

T.V. Kuzina, A.V. Kuzin

Abstract

Background. Currently, environmental changes during oil and gas production in the Northern Caspian Sea are controlled through local environmental monitoring, the obligation of which is determined by Federal Standards and Regulations. Biochemical and cytogenetic markers are distinguished among the markers for assessing the state of aquatic organisms.

Purpose. Assessment of cytogenetic parameters and markers of oxidative stress in a monkey goby captured at the sites of liquidated wells by «LUKOIL-Nizhnevolzhskneft».

Materials and methods. The study was conducted on 308 fish specimens. Cytogenetic disorders were investigated by a micronucleus test. The intensity of POL in liver tissues was assessed by the level of accumulation of MDA. The results were processed statistically using Microsoft Office Excel 2007 software.

Results. The average frequency of occurrence of erythrocytes with micronuclei in fish in some areas exceeded the level of spontaneous mutagenesis, and amounted to 0.25%. An increased content of MDA in hepatocytes was noted. The analysis between the indicators of oxidative stress and the number of micronuclei allows us to conclude that the formation of micronuclei after exposure to free radicals may be an adaptive response to this stress factor in living conditions.

Conclusion. The obtained results of biochemical and cytogenetic studies indicate the presence of two simultaneous pathological processes in fish. On the one hand, an increase in the intensity of free radical oxidation processes, on the other, genome instability with an increased number of cytogenetic rearrangements. Consequently, the destabilization of the genome occurs against the background of activation of free radical processes, and with an increase in the level of MDA above 65 nmol, the mutagenic effect of free radicals on the genome increases significantly.

Keywords: MDA; micronuclei; erythrocytes; oxidative stress; genetic monitoring

For citation. Kuzina, T. V., & Kuzin, A. V. (2025). Assessment of cytogenetic index and marker of oxidative stress in a monkey goby (*Neogobius fluviatilis*) native to the Northern Caspian Sea. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(6-1), 217-229. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-6-1-1334>

Введение

Создание Единой системы государственного экологического мониторинга направлено на защиту окружающей среды. Одной из ключевых задач этого мониторинга является регулярное отслеживание состояния окружающей среды, включая компоненты природной среды и естественные экосистемы, а также наблюдение за процессами, явлениями и изменениями, происходящими в этой среде. Оценка состояния окружающей среды в местах размещения объектов нефтегазодобычи дается на основе анализа как химического состава морской воды, так и изменений биохимических показателей ихтиофауны, обитающей в местах расположения нефтегазодобывающей отрасли. Привлечение широкого комплекса биохимических показателей позволяет выявить механизмы воздействия поллютантов на определенные звенья метаболизма, провести раннюю диагностику токсикозов, определить основные загрязнители и степень их

токсичности для гидробионтов [6]. Среди биохимических показателей результативными являются оценка интенсивности протекания перекисных процессов в организме рыб, прежде всего в печени. Изменение качества воды способно усиливать окислительный стресс у гидробионтов, который можно отслеживать с помощью различных показательных маркеров [7]. Печень в силу своих функциональных особенностей, быстрее других органов реагирует на изменение условий внешней среды и действие токсических агентов. Оценивая ряд биохимических показателей гепатоцитов, в частности уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ), можно судить о степени адаптационных или патологических изменений в печени. Высокое содержание вторичного продукта ПОЛ – малонового диальдегида (МДА), свидетельствует о сниженной активности антиоксидантной защиты в гепатоцитах, и как следствие, повышении вероятности развития в клетках патологических процессов.

МДА образуется в процессе свободно-радикального окисления полиненасыщенных жирных кислот, которые содержатся в фосфолипидах клеточных мембран, происходит это под воздействием активных форм кислорода (АФК). При этом малоновый диальдегид является высокотоксическим соединением, вызывающим полимеризацию белков, разрушение ДНК, модификацию липидного слоя клеточных мембран [9]. Процессы перекисного окисления липидов являются общебиологическими и играют ключевую роль в метаболизме, приводя к повышению проницаемости клеточных мембран и, в итоге, к цитолизу. Накопление продуктов ПОЛ замедляет клеточное деление, вызывает сужение сосудов и ухудшает кровоснабжение тканей. Супероксид и другие активные формы кислорода, присутствующие в нормально работающих клетках, выполняют функции посредников, участвуют в сигнальной трансдукции и помогают поддерживать окислительно-восстановительный баланс клеток и уровень ионов кальция. Однако их избыток приводит к окислительной модификации белков, активации процессов ПОЛ в мембранах, инактивации ферментов и повреждению ДНК [11].

Метод учета микроядер в клетках крови для оценки нестабильности генома является наиболее чувствительным [8]. Так в работах таких авторов, как Крюков В. И., Кочкарёв П. В. приводятся результаты исследования частоты микроядер в клетках крови 9 видов рыб из пресных водоёмов полуострова Таймыр (0-0,15%) [5]. Другими авторами приводятся данные о встречаемости эритроцитов с микроядрами и с повреждениями ДНК, выявляемыми методом ДНК-комет, у леща *Abramis brama* и серебряного карася *Carassius gibelio* дельты р. Волга в сентябре 2021 г. В результатах

данного исследования авторы не отмечают повышенной частоты встречаемости клеток с микроядрами [3].

В литературных источниках имеется достаточно много информации по частоте встречаемости эритроцитов с микроядрами. В работе Крюкова В. И. анализ частот клеток с микроядрами по местам вылова рыб (независимо от их видовой принадлежности) показал, что минимальные частоты клеток с микроядрами обнаружены у рыб из Енисея в районе посёлка Ананьи-но (0,04%). Несколько выше были частоты аберрантных клеток в крови рыб из озера Кета и Ла-даннах (0,05 и 0,06, соответственно). Максимальная частота (0,10%) аномальных клеток обнаружена у рыб, отловленных в Енисее у посёлка Потапово. Более чем двукратные различия в частотах микроядер у рыб, отловленных в Енисее на участках, разделённых всего 170-200 километрами, автор объясняет разным видовым составом выборок [5].

Согласно литературным данным все большую роль в образовании микроядер отводят эпигенетическим процессам. Вероятно, что гипометилирование ДНК в центромерной области может модифицировать платформу для правильной ориентации кинетохор и прикрепления к веретену, что приводит к неправильной сегрегации хромосом и образованию микроядер. Такая гипотеза в основном подтверждается проводимыми экспериментами с участием активаторов/ингибиторов метилирования ДНК, которые влияют на образование микроядер. Например, обработка фибробластов человека *S*-аденозилметионином (SAM) снижает частоту микроядер, вызываемого арсенитом натрия [15]. Генотоксичность мышьяка характеризуется образованием свободных радикалов, изменениями в паттернах метилирования ДНК, ингибированием репарации ДНК и образованием микроядер. Следует заметить, что в этом исследовании SAM снизил уровень микроядер, индуцированных мышьяком [15]. Эти литературные данные позволяют судить об эпигенетических механизмах образования микроядер. Таким образом, образование микроядер индуцируется эпигенетически, главным образом, за счет потери метилирования ДНК. В частности, гипометилирование гетерохроматина в периферических областях связано с деконденсацией хроматина, что приводит к неправильному разделению хромосом и обособлению микроядер; тогда как глобальное гипометилирование связано с несвязанным хроматином, повышенной экспрессией генов, повышенным повреждением ДНК и разрывами хромосом, вследствие чего образуются микроядра из ацентрических фрагментов хромосом [15].

Цель исследования – оценить уровень цитогенетических показателей и маркера оксидативного стресса у бычка-песочника (*N. fluviatilis*), обитающего в местах ликвидированных поисково-оценочных скважин ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть» в мелководной части Северного Каспия, в рамках программы производственного экологического контроля и мониторинга.

Материалы и методы исследования

Работа выполнялась в рамках научно-исследовательской работы «Проведение физиологических исследований гидробионтов в районах поисково-оценочного бурения на ЛУ ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть» в 2022-2023 гг.» на базе лаборатории «Биомедицины, физиологии и генетики» Астраханского государственного университета имени В.Н. Татищева. Материал для исследования был собран в ходе экспедиционных выездов на мелководную часть Северного Каспия (табл. 1), доставлен в лабораторию в замороженном виде.

Таблица 1.

Точки отбора проб в мелководной части Северного Каспия

Полигон	Координаты	
	Широта	Долгота
2	44,90830	48,94943
4	44,91783	48,96457
5	44,92013	48,96760
6	44,92322	48,97230
7	44,91952	48,95890
8	44,92283	48,95862
9	44,92723	48,95862
10	44,92910	48,99507
11	44,90547	48,95892
12	44,90800	48,95850
13	44,90098	48,95862
14	44,89780	48,99241
15	44,89777	48,92926
16	44,92896	48,93570

Интенсивность перекисного окисления липидов в гепатоцитах определяли по уровню накопления вторичных продуктов. Концентрацию МДА оценивали спектрофотометрическим методом, основанном на образова-

нии окрашенного комплекса МДА с тиобарбитуровой кислотой при нагревании [10].

Исследование проведено на 308 экземплярах рыб. Цитогенетические нарушения исследовали в эритроцитах периферической крови микроядерным тестом (OECD Test №474, 2016). Каплю крови наносили на чистое сухое предметное стекло и покровным стеклом готовили мазок. Препараты высушивали на воздухе в течение нескольких часов. Свежие высушенные мазки фиксировали 90% этиловым спиртом. Сухие препараты окрашивали красителем Гемокрафикс. Для исследования уровня эритроцитов с микроядрами осматривали по 1-2 препарата от каждого образца. В каждом случае анализировали 10000 эритроцитов. Число эритроцитов с микроядрами выражали в %. За микроядра принимали хроматиновое тело округлой или овальной формы с гладким непрерывным краем, размером не более 1/3 ядра, лежащее четко отдельно от ядра, не преломляющее свет, имеющее интенсивность окрашивания и рисунок хроматина, как у основного ядра, и находящееся в одной плоскости с ядром.

Результаты обработаны статистически с помощью программ «Microsoft Office Excel 2007» и «Statistica 10», достоверность оценивали по критерию Стьюдента. При статистической обработке данных вычисляли средние значения и их ошибку. Достоверность различий оценивали при $p \leq 0.05$.

Результаты и обсуждение

О степени окислительного стресса судили по накоплению (МДА), который является цитотоксическим продуктом перекисного окисления липидов и индикатором последующего повреждения тканей. Среднее значение накопления МДА в печени бычков по всем полигонам в 2023 году снизилось относительно 2022 г. В 2023 г. не было отмечено сверх высоких показателей МДА в печени рыб. В то время как на полигоне 3 в 2022 г. средний показатель содержания вторичного продукта ПОЛ превышал 110,0 нмоль. На полигонах 10 и 13 показатель МДА был на одном уровне в 2022 г. и составлял 71,73 и 71,44 нмоль соответственно. Низкие значения этого продукта отмечены на полигонах 4 и 15 в 2022 г. В 2023 г. уровень МДА превышал условную физиологическую норму (60 нмоль) на четырёх полигонах. На полигоне 1 зафиксирован самый низкий уровень МДА – 7,27 нмоль.

На рисунке 1 представлена диаграмма накопления МДА в печени и микроядер в эритроцитах периферической крови рыб за годы исследования, а с помощью регрессионного анализа построена трендовая модель с коэффициентом аппроксимации $R^2=0,6797$ в 2022 г. и $R^2=0,6232$ в 2023 г.

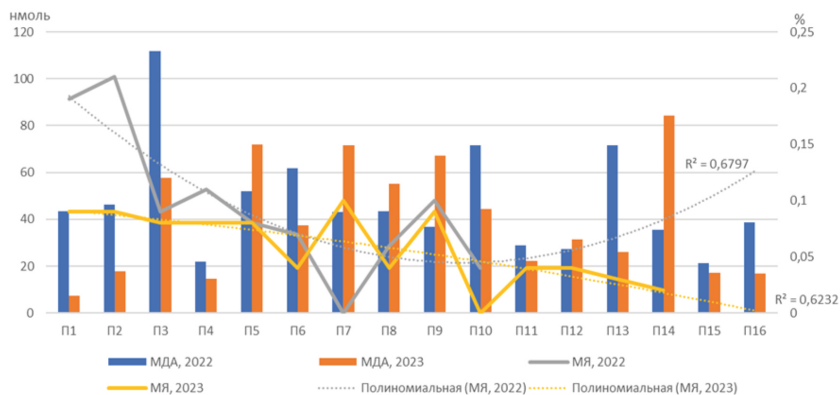


Рис. 1. Изменения накопления МДА в печени и МЯ в эритроцитах бычковых рыб Северного Каспия

Доля эритроцитов с микроядрами у бычка-песочника (*N. fluviatilis*), обитающего в Северном Каспии, несколько превышала значения, указанные в литературных данных, согласно которым в норме частота встречаемости клеток с микроядрами при спонтанном мутагенезе равна 0,5-1‰ и составила $1,2 \pm 0,21\%$. Данные показатели свидетельствуют о начальных развивающихся патологических процессах в клетках крови рыб.

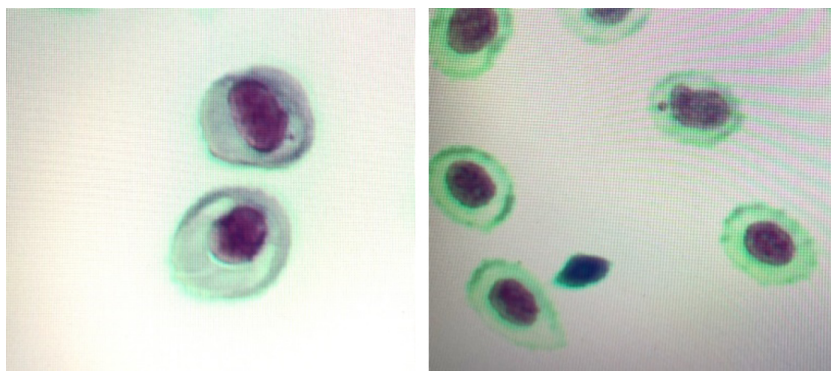


Рис. 2. Эритроциты с микроядрами в периферической крови бычков, ув. $\times 1000$

Обнаруженные цитогенетические нарушения указывают на дестабилизацию генома проанализированных рыб. Нестабильность может возникать из-за увеличенной генерации эндомутагенов, что приводит к поврежде-

нию метаболических процессов и, как следствие, к росту числа клеток с цитогенетическими изменениями.

Неспецифические биомаркеры не указывают на конкретную причину эффекта, но отражают общий, комплексный характер комбинированного воздействия. К такому типу биомаркеров относят показатель, указывающий на развитие в клетке состояния окислительного стресса: продукты перекисного окисления липидов ПОЛ (малоновый диальдегид). В свою очередь уровень клеток крови с микроядрами может быть удобным биомаркером ранних эффектов генотоксических веществ. Наши исследования подтверждают, что уровень клеток с цитогенетическими нарушениями у гидробионтов зависит от активности образования продуктов перекисного окисления липидов - малонового диальдегида.

Результаты биохимического и цитогенетического исследований показывают, что у изученных рыб наблюдаются два одновременно протекающих патологических процесса. С одной стороны, отмечается увеличение интенсивности свободнорадикального окисления, а с другой - нестабильность генома с повышенным количеством цитогенетических перестроек. Это указывает на то, что дестабилизация генома происходит на фоне активизации свободнорадикальных процессов, и при уровне МДА выше 65 нмоль значительно усиливается мутагенное воздействие свободных радикалов на геном, что ведет к росту спонтанного мутагенеза - 0,21%.

Таким образом, по уровню накопления вторичного продукта ПОЛ можно судить о выраженности окислительного стресса как фактора, дестабилизирующего геном.

Список литературы

1. Гераськин, С. А., & Сарапульцева, Е. И. (Ред.). (2010). *Биологический контроль окружающей среды: генетический мониторинг* (208 с.). Издательский центр «Академия».
2. Мирошниченко, И. К., Семёнова, П. В., Прибыткова, Е. В., & Терентьев, К. Ю. (2023). Биохимические процессы в тканях гидробионтов как маркеры окислительного стресса при биомониторинге антропогенного воздействия на водные экосистемы. *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки*, (4). <https://doi.org/10.37614/2949-1215.2023.14.4.033>. EDN: <https://elibrary.ru/TLRZZD>
3. Конькова, А. В., Файзулина, Д. Р., Ширина, Ю. М., Богатов, И. А., Астафьева, С. С., & Жукова, К. А. (2023). Гематологические и генотоксические показатели леща *Abramis brama* и серебряного карася *Carassius*

- gibelio* (Cyprinidae) дельты реки Волга. *Вопросы ихтиологии*, 63(2), 218–225. <https://doi.org/10.31857/S0042875223020121>. EDN: <https://elibrary.ru/EZHCKZ>
4. Иванова, Т. И., Фесенко, Э. В., Дзиковская, Л. А., Дегтярёва, Е. С., Мкртчян, Л. С., Овсянникова, Н. С., Хорохорина, В. А., & Крикунова, Л. И. (2018). Исследование аберраций хромосом и маркёров оксидативного стресса (малоновый диальдегид, общая антиоксидантная активность плазмы) у жительниц загрязнённых после аварии на ЧАЭС территорий. *Радиация и риск (Бюллетень НРЭП)*, (2), 46–61. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2018-27-2-46-61>. EDN: <https://elibrary.ru/XRBFAL>
 5. Крюков, В. И. (2013). Частота микроядер в клетках крови рыб пресных водоёмов полуострова Таймыр. *Образование, наука и производство*, (1–2). EDN: <https://elibrary.ru/QCKEDJ>
 6. Кузина, Т. В. (2018). Анализ взаимосвязи цитогенетического гомеостаза и оксидативного стресса в организме бычковых рыб Северного Каспия. *Юг России: экология, развитие*, 13(2), 64–72. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-2-64-72>. EDN: <https://elibrary.ru/XUTKEN>
 7. Ильинских, Н. Н., Ильинских, И. Н., Новицкий, В. В., & Ванчугова, Н. Н. (1992). *Микроядерный анализ и цитогенетическая нестабильность* (272 с.). Изд-во Томского ун-та. EDN: <https://elibrary.ru/QNLOLJ>
 8. Мороз, В. В. (2005). Проблемы структурной и функциональной геномики при критических состояниях. *Общая реаниматология*, (4). EDN: <https://elibrary.ru/IFAHSB>
 9. Соколова, А. С. (2020). Возрастные изменения уровня малонового диальдегида в тканях двустворчатого моллюска *Anodonta cygnea* (L., 1758). *Биология внутренних вод*, (1), 97–101. <https://doi.org/10.31857/S0320965220010167>. EDN: <https://elibrary.ru/XEDLBE>
 10. Строев, Е. А., & Макарова, В. Г. (1986). *Практикум по биологической химии* (с. 211–214). Высшая школа. EDN: <https://elibrary.ru/WBNBEN>
 11. Чернышова, Е. Н. (2013). Процессы перекисного окисления липидов и преждевременное старение при метаболическом синдроме. *Кубанский научный медицинский вестник*, 1(136), 181–184. EDN: <https://elibrary.ru/QCCQMV>
 12. Abdel-Khalek, A. A. (2015). Antioxidant responses and nuclear deformations in freshwater fish, *Oreochromis niloticus*, facing degraded environmental conditions. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 94, 701–708. <https://doi.org/10.1007/s00128-015-1509-5>. EDN: <https://elibrary.ru/FPUIAA>
 13. D'Agostini, F. (2021). Micronuclei in fish erythrocytes as genotoxic biomarkers of water pollution: an overview. *Reviews of Environmental Contamination*

- and Toxicology*, 195–240. https://doi.org/10.1007/398_2021_76. EDN: <https://elibrary.ru/JRHTHB>
14. Harabawy, A. S. (2014). The role of vitamins A, C, E and selenium as antioxidants against genotoxicity and cytotoxicity of cadmium, copper, lead and zinc on erythrocytes of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 104, 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.02.015>. EDN: <https://elibrary.ru/YFBANV>
 15. Luzhna, L. (2013). Micronuclei in genotoxicity assessment: from genetics to epigenetics and beyond. *Frontiers in Genetics, Section: Epigenomics and Epigenetics*, (4). <https://doi.org/10.3389/fgene.2013.00131>. EDN: <https://elibrary.ru/RPHDPR>
 16. Кузина, Т. В., & Кузин, А. В. (2020). Использование маркера оксидативного стресса (МДА) и цитогенетического маркера в системе эколого-генетического мониторинга Северного Каспия. *Юг России: экология, развитие*, 15(1), 99–106. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-1-99-106>. EDN: <https://elibrary.ru/DJYJLS>
 17. OECD. (2016). *OECD Test No. 474: Mammalian Erythrocyte Micronucleus Test*. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 4. OECD Publishing.
 18. Obiakor, M. O., Okonkwo, J. C., Nnabude, P. C., & Ezeonyejiaku, C. D. (2012). Eco genotoxicology: micronucleus assay in fish erythrocytes as in situ aquatic pollution biomarker: a review. *Journal of Animal Science Advances*, 2(1), 123–133.

References

1. Geraskin, S. A., & Sarapultseva, E. I. (Eds.). (2010). *Biological monitoring of the environment: genetic monitoring*. 208 p. Publishing Center “Academy”
2. Miroshnichenko, I. K., Semenova, P. V., Pribytkova, E. V., & Terentiev, K. Yu. (2023). Biochemical processes in tissues of aquatic organisms as markers of oxidative stress in biomonitoring of anthropogenic impact on aquatic ecosystems. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences*, (4). <https://doi.org/10.37614/2949-1215.2023.14.4.033>. EDN: <https://elibrary.ru/TLRZZD>
3. Konkova, A. V., Fayzulina, D. R., Shirina, Yu. M., Bogatov, I. A., Astafyeva, S. S., & Zhukova, K. A. (2023). Hematological and genotoxic parameters of bream *Abramis brama* and Prussian carp *Carassius gibelio* (Cyprinidae) in the Volga River delta. *Journal of Ichthyology*, 63(2), 218–225. <https://doi.org/10.31857/S0042875223020121>. EDN: <https://elibrary.ru/EZHCKZ>
4. Ivanova, T. I., Fesenko, E. V., Dzikovskaya, L. A., Degtyareva, E. S., Mkrtchyan, L. S., Ovsyannikova, N. S., Khorokhorina, V. A., & Krikunova, L. I. (2018).

- Study of chromosome aberrations and oxidative stress markers (malondialdehyde, total antioxidant activity of plasma) in residents of territories contaminated after the Chernobyl accident. *Radiation and Risk (Bulletin of the NRER)*, (2), 46–61. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2018-27-2-46-61>. EDN: <https://elibrary.ru/XRBFAL>
5. Kryukov, V. I. (2013). Frequency of micronuclei in blood cells of fish from freshwater bodies of the Taimyr Peninsula. *Education, Science and Production*, (1–2). EDN: <https://elibrary.ru/QCKEDJ>
 6. Kuzina, T. V. (2018). Analysis of the relationship between cytogenetic homeostasis and oxidative stress in gobiid fish of the Northern Caspian. *South of Russia: Ecology, Development*, 13(2), 64–72. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-2-64-72>. EDN: <https://elibrary.ru/XUTKEH>
 7. Ilyinskikh, N. N., Ilyinskikh, I. N., Novitsky, V. V., & Vanchugova, N. N. (1992). *Micronucleus analysis and cytogenetic instability*. 272 p. Tomsk University Press. EDN: <https://elibrary.ru/QNLLOJ>
 8. Moroz, V. V. (2005). Problems of structural and functional genomics in critical conditions. *General Resuscitation*, (4). EDN: <https://elibrary.ru/IFAHSB>
 9. Sokolova, A. S. (2020). Age-related changes in malondialdehyde levels in tissues of the bivalve mollusk *Anodonta cygnea* (L., 1758). *Inland Water Biology*, (1), 97–101. <https://doi.org/10.31857/S0320965220010167>. EDN: <https://elibrary.ru/XEDLBE>
 10. Stroev, E. A., & Makarova, V. G. (1986). *Practical course in biological chemistry* (pp. 211–214). Vysshaya Shkola. EDN: <https://elibrary.ru/WBNBEN>
 11. Chernyshova, E. N. (2013). Lipid peroxidation processes and premature aging in metabolic syndrome. *Kuban Scientific Medical Bulletin*, 1(136), 181–184. EDN: <https://elibrary.ru/QCCQMV>
 12. Abdel Khalek, A. A. (2015). Antioxidant responses and nuclear deformations in freshwater fish, *Oreochromis niloticus*, facing degraded environmental conditions. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 94, 701–708. <https://doi.org/10.1007/s00128-015-1509-5>. EDN: <https://elibrary.ru/FPUIAA>
 13. D'Agostini, F. (2021). Micronuclei in fish erythrocytes as genotoxic biomarkers of water pollution: an overview. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 195–240. https://doi.org/10.1007/398_2021_76. EDN: <https://elibrary.ru/JRHTHB>
 14. Harabawy, A. S. (2014). The role of vitamins A, C, E and selenium as antioxidants against genotoxicity and cytotoxicity of cadmium, copper, lead and zinc on erythrocytes of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 104, 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.02.015>. EDN: <https://elibrary.ru/YFBANV>

15. Luzhna, L. (2013). Micronuclei in genotoxicity assessment: from genetics to epigenetics and beyond. *Frontiers in Genetics, Section: Epigenomics and Epigenetics*, (4). <https://doi.org/10.3389/fgene.2013.00131>. EDN: <https://elibrary.ru/RPHDPR>
16. Kuzina, T. V., & Kuzin, A. V. (2020). Use of an oxidative stress marker (MDA) and a cytogenetic marker in the system of ecological and genetic monitoring of the Northern Caspian. *South of Russia: Ecology, Development*, 15(1), 99–106. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-1-99-106>. EDN: <https://elibrary.ru/DJYJLS>
17. OECD. (2016). *OECD Test No. 474: Mammalian erythrocyte micronucleus test*. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 4. OECD Publishing
18. Obiakor, M. O., Okonkwo, J. C., Nnabude, P. C., & Ezeonyejiaku, C. D. (2012). Eco-genotoxicology: micronucleus assay in fish erythrocytes as in situ aquatic pollution biomarker: a review. *Journal of Animal Science Advances*, 2(1), 123–133

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Кузина Татьяна Вячеславовна, доцент, кандидат биологических наук
Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева
ул. Татищева, 20а, г. Астрахань, 414056, Российская Федерация
tatuls@mail.ru

Кузин Алексей Владимирович, ведущий специалист, кандидат географических наук
ПАО «ЛУКОЙЛ»
Сретенский бульвар, 11, г. Москва, 101000, Российская Федерация

DATA ABOUT THE AUTHORS

Tatiana V. Kuzina, Associate Professor, Candidate of Biological Sciences.
Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev
20a, Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russian Federation
tatuls@mail.ru

Alexey V. Kuzin, Leading Specialist, Candidate of Geographical Sciences
PJSC LUKOIL
11, Sretensky Boul., Moscow, 101000, Russian Federation

Поступила 10.05.2025

После рецензирования 02.07.2025

Принята 24.07.2025

Received 10.05.2025

Revised 02.07.2025

Accepted 24.07.2025