

Цитогенетические последствия воздействия бензина на *Lepidium sativum* L.

© 2024. Л. С. Тупицына, к. б. н., доцент, Е. О. Волкова, магистр, С. С. Тупицын, к. б. н., доцент, З. В. Шейкина, ассистент, Тюменский государственный университет, 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6, e-mail: s.s.tupicyn@utmn.ru

Цель исследования заключалась в характеристике экологических последствий воздействия бензина на биологические объекты. На сегодняшний день нефть и продукты её переработки остаются одними из самых распространённых поллютантов. Новизна и актуальность работы определяется минимальной базой данных, касающихся цитогенетических изменений в результате воздействия бензина на биоту. Регистрация подобных экологических последствий, как правило, негативных, диктует необходимость разработки направлений и методов рекультивации загрязнённых территорий.

Последствия действия бензина были выявлены в эксперименте с модельным растительным объектом – кресс-салатом (*Lepidium sativum* L.). Было изучено воздействие бензина АИ-95 в концентрациях 3, 5, 10% (водный раствор). Для цитогенетического анализа просмотрены временные давленные микропрепараты срезов корешков, окрашенные ацетоорсеином. Для учёта хромосомных нарушений использован анафазный метод.

По результатам исследования бензин можно охарактеризовать как мутаген: уровень мутаций (мосты, фрагменты, микроядра) при действии бензина в концентрации 5 % выше, чем в контроле, в 35 раз. Множественные нарушения зарегистрированы только в результате воздействия исследуемого поллютанта, который также детерминирует резкое увеличение частоты микроядер. Доля aberrantных анафаз от числа общего числа анафаз в контроле составила 1,2%, в опытных вариантах повышается до 42,0, 68,4 и 79,6% при действии бензина в концентрациях 3, 5 и 10% соответственно.

Зарегистрирована митотоксическая, а также цитотоксическая активность, проявляющаяся в понижении митотического индекса и изменении соотношения фаз митоза. В опытных вариантах понижена частота клеток в анафазе и увеличена доля клеток на стадии профазы, что может быть обусловлено увеличением времени работы систем репарации. Новые экспериментальные данные по генотоксичности бензина пополняют информационную базу данных о негативных последствиях воздействия бензина на растительные объекты.

Ключевые слова: хромосомные аномалии, митотический индекс, фазы митоза, *Lepidium sativum* L., экотоксичность бензина.

Cytogenetic aftermath by gasoline impact on *Lepidium sativum* L.

© 2024. L. S. Tupicyna ORCID: 0000-0001-9544-3418, E. O. Volkova ORCID: 0000-0003-2220-367X, S. S. Tupitsin ORCID: 0000-0001-5986-3669, Z. V. Shejkina ORCID: 0000-0003-1483-739X, Tyumen State University, 6, Volodarskogo St., Tyumen, Russia, 625003, e-mail: s.s.tupicyn@utmn.ru

The study aimed to characterize the ecological aftermath of the impact of gasoline on biological objects. On today, oil and products from it remain one of the most common pollutants. The novelty and relevance of the study are determined by the minimum database of cytogenetic changes after impact of gasoline on biota. The registration of such consequences, as a rule, negative ones, dictates the need to develop directions and methods for the reclamation of contaminated areas.

An experimental study using a model plant object – watercress (*Lepidium sativum* L.) revealed the aftermath of gasoline impact. This object made it possible to identify a complex of changes determined by the gasoline. The experiment studied the effect of AI-95 gasoline in concentrations of 3, 5, 10% (water solution). For cytogenetic analysis, temporary compressed micro preparations of root sections stained with acetoorcein were examined. The anaphase method was used to account the chromosomal abnormalities.

Gasoline can also be characterized as a mutagen. The level of mutations (bridges, fragments, micronucleus) under the impact of gasoline at a concentration of 5% is 35 times higher than in the control. Multiple violations were registered only as a result of impact by the investigated pollutant, which determines a high increase in the frequency of micronucleus.

The proportion of aberrant anaphases in the total number of anaphases in the control was 1,2%, in the experimental variants it increased to 42,0, 68,4 and 79,6% under the impact of gasoline at concentrations of 3, 5 and 10%.

Mitotoxic, as well as cytotoxic activity, was recorded. It is shown in a decrease in the mitotic index and a change in the ratio of mitotic phases. In the experimental variants, the frequency of cells in anaphase is decreased and the proportion of cells at the prophase stage is increased. That may be due to increase repair systems operating time. New experimental data on the genotoxicity of gasoline replenish the information database on the negative consequences of the impact of gasoline on plant objects.

Keywords: chromosomal abnormalities, mitotic index, phases of mitosis, *Lepidium sativum* L., ecotoxicity of gasoline.

Очевидная и широко обсуждаемая экологическая проблема сегодня – существование организмов в антропогенно изменённой среде обитания. Поэтому усилия исследователей направлены на регистрацию уровня загрязнения биосферы и, в связи с этим, характеристику изменений её обитателей. Такого рода изменения фиксируют на разных уровнях организации живого, изучая разнообразные признаки: морфологические, физиологические, поведенческие и т.п. Популярными являются исследования, связанные с оценкой генетических последствий воздействия окружающей среды. Последнее направление реализуется, в частности, через генетический скрининг различных природных образцов (воды, почвы, донных отложений и т. п.) и отдельных экологических факторов разной природы (физических, химических, биологических) и происхождения [1–5].

Одним из самых распространённых загрязнителей на сегодняшний день являются нефть и продукты её переработки, в частности, бензин. Источником бензина в окружающей среде являются, например, автозаправочные станции, в зоне которых загрязнитель распространяется во всех средах жизни.

Цель нашего исследования заключалась в характеристике генотоксических последствий воздействия бензина на растительный модельный объект *Lepidium sativum* L.

Материалы и методы исследования

Для достижения цели было выполнено лабораторное исследование, результаты которого позволили оценить такие параметры, как: частота хромосомных aberrаций, митотическая активность, соотношение фаз митоза.

В работе были изучены последствия воздействия бензина АИ-95, который использовали в 3 концентрациях: 3, 5 и 10% (водный раствор). Модельным объектом выбран кресс-салат (*Lepidium sativum* L.) сорта «Дукат».

Семена салата (n = 800) проращивали в чашках Петри (25 чашек по 30 семян и 2 чашки по 25 семян) на фильтровальной

бумаге в течение 72 ч. Каждую чашку Петри накрывали мерными стаканами объёмом 1000 мл.

Для цитогенетического анализа готовили временные давленные препараты срезов корешков растений, окрашенные ацетоорсеином. Для анализа был использован анафазный метод согласно стандартной технологии [6, 7]. Приготовленные микропрепараты просматривали под микроскопом при увеличении $\times 100$. Подсчитывали число делящихся клеток, выделяли нормальные и аномальные митозы.

Статистическую достоверность различий средних значений оценивали с помощью t-критерия Стьюдента, распределений частот – χ^2 ($p = 0,95$).

Результаты и обсуждение

Результаты цитогенетического анализа позволили сделать вывод о генотоксичности бензина для кресс-салата. Прямой пропорциональной зависимости от концентрации бензина при этом не выявлено. И в контроле, и в опытных вариантах зарегистрированы такие аномалии как: одиночные и множественные мосты, фрагменты, микроядра. Клетки с комплексными нарушениями обнаружены только при действии бензина. Суммарная частота aberrаций при воздействии бензина в концентрации 5% в 35 раз выше контрольных значений (табл., рис. 1 и 2). Доля aberrантных анафаз (от общего числа анафаз) в контроле равна 1,2%, в опытных повышается до 42,0, 68,4 и 79,6% при воздействии бензина в концентрациях 3, 5 и 10% соответственно.

Доля клеток в разных фазах митоза при воздействии бензина статистически достоверно отличается от аналогичного в контрольном варианте: уменьшается (почти в 2 раза) доля анафаз, частота профаз при этом увеличивается (рис. 3).

Митотическая активность при действии бензина резко (статистически достоверно) уменьшается (рис. 4). Величина митотического индекса тем меньше, чем выше концентрация исследуемого нефтепродукта.

Таблица / Table

Частота различных хромосомных aberrаций в клетках корневого чехлика кресс-салата при воздействии бензина в разных концентрациях (%) / Frequency of various chromosomal aberrations in the watercress root cap cells exposed by gasoline (%)

Хромосомные нарушения Chromosomal abnormalities	Концентрации бензина, % / Gasoline concentrations, %			
	0	3	5	10
Множественные мосты Multiple bridges	0,13±0,02	1,74±0,01* <i>I</i>	3,73±0,01* <i>№</i> <i>i</i>	2,38±0,01* <i>№</i> <i>I</i>
Одиночные мосты Single bridges	0,13±0,01	4,85±0,02* <i>I</i>	3,73±0,01* <i>№</i> <i>i</i>	2,38±0,01* <i>№</i> <i>I</i>
Фрагменты / Fragments	0,05±0,01	2,55±0,01* <i>I</i>	1,63±0,01* <i>№</i> <i>i</i>	1,60±0,01* <i>№</i> <i>i</i>
Микроядра / Micronucleus	0,02±0,01	1,88±0,01* <i>I</i>	2,92±0,01* <i>№</i> <i>i</i>	1,97±0,01* <i>№</i> <i>I</i>
Комплексные aberrации Complex aberrations	0,00±0,01	0,34±0,01* <i>I</i>	0,55±0,02* <i>№</i> <i>i</i>	0,60±0,03* <i>№</i> <i>i</i>
Число просмотренных клеток одного растения / The number of cells viewed per plant				
Число / Number	2058–2820	1799–2320	1256–1892	1090–1609

Примечание: * – ($p < 0,001$) – статистически достоверные различия с контрольным вариантом; *№* – с 1 опытным вариантом (3%); *I* – со 2 опытным вариантом (5%); *i* – с 3 опытным вариантом (10%).

Note: * – ($p < 0,001$) – statistically significant differences with the control option; *№* – with 1 experimental variant (3%); *I* – with 2 experimental variant (5%); *i* – with 3 experimental variant (10%).

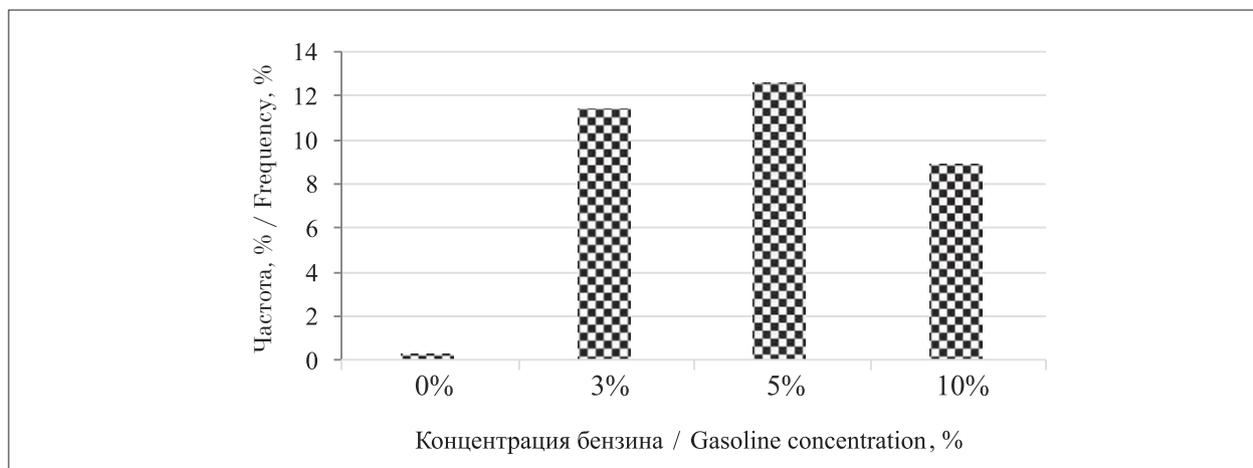


Рис. 1. Суммарная частота хромосомных нарушений в клетках корневого чехлика кресс-салата при разных концентрациях бензина
Fig. 1. The total frequency of abnormalities in the watercress root cap cells at different gasoline concentrations

Таким образом, генетический скрининг с использованием растительного объекта позволил сделать вывод о мутагенных свойствах бензина.

Ряд авторов при этом указывает на одновременный цитогенетический эффект, проявляющийся в изменении пролиферативной активности и изменении соотношения доли клеток в разных фазах митоза [8]. В случае воздействия бензина АИ-95 даже в минимальной (3%) из используемых концентраций митотический индекс существенно снижается. Исследуемый поллютант определяет не только увеличение продолжительности интерфазы, но и профазы, что интерпретируют как воз-

можность увеличения времени работы систем генетической репарации [9, 10].

Экспериментально доказано увеличение скорости включения H^3 -тимидина как показателя усиления репаративного синтеза и C^{14} -лейцина, сигнализирующего об активном замещении или восстановлении повреждённых белков в условиях техногенного загрязнения [10]. Но следует указать, что ионы свинца, например, детерминируют понижение продолжительности профаз (как и анафаз), что связывают с нарушением процесса сборки микротрубочек [11].

Данные по анализу цитогенетических нарушений в соматических клетках растений

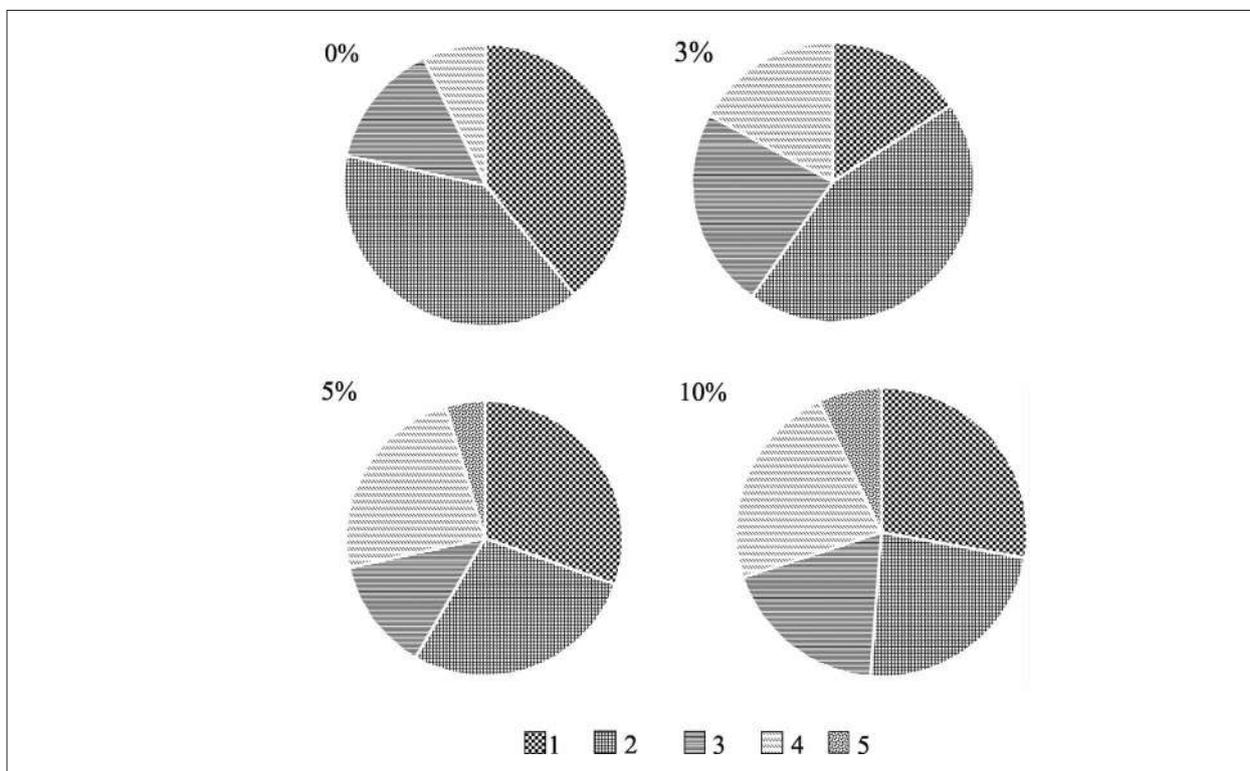


Рис. 2. Относительная частота хромосомных aberrаций в аномальных анафазах клеток корневого чехлика кресс-салата при воздействии бензина: 1 – множественные мосты; 2 – одиночные мосты; 3 – фрагменты; 4 – микроядра; 5 – комплексные aberrации
Fig. 2. Relative frequency of chromosomal abnormalities in abnormal anaphases of watercress root cap cells exposed by gasoline: 1 – multiple bridges; 2 – single bridges; 3 – fragments; 4 – micronucleus; 5 – complex aberrations

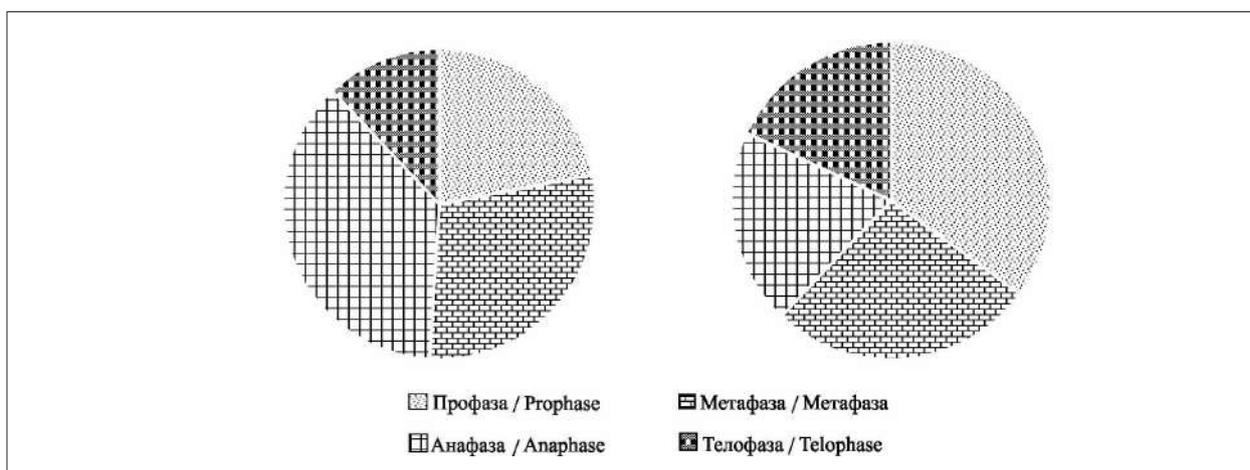


Рис. 3. Доля фаз (%) митоза в клетках корневого чехлика кресс-салата в контроле и при воздействии бензина
 Примечание: в контроле просчитано 27079 клеток, в опытных вариантах – 22657
Fig. 3. The proportion of mitosis phases (%) of in the watercress root cap cells in control and under gasoline exposure
 Note: 27,079 cells were counted in the control, 22,657 in the experimental variants

вследствие неблагоприятного воздействия среды согласуются с данными физиологической оценки животных организмов, в частности, оксидативного стресса. Так, чем выше скорость процессов окисления в тканях рыб, тем боль-

шее количество нарушений в ядре эритроцитов периферической крови: кариорексис (ядро при сохранении ядерной оболочки распадается на отдельные части), кариопикноз (хроматин ядра уплотняется) и кариолизис

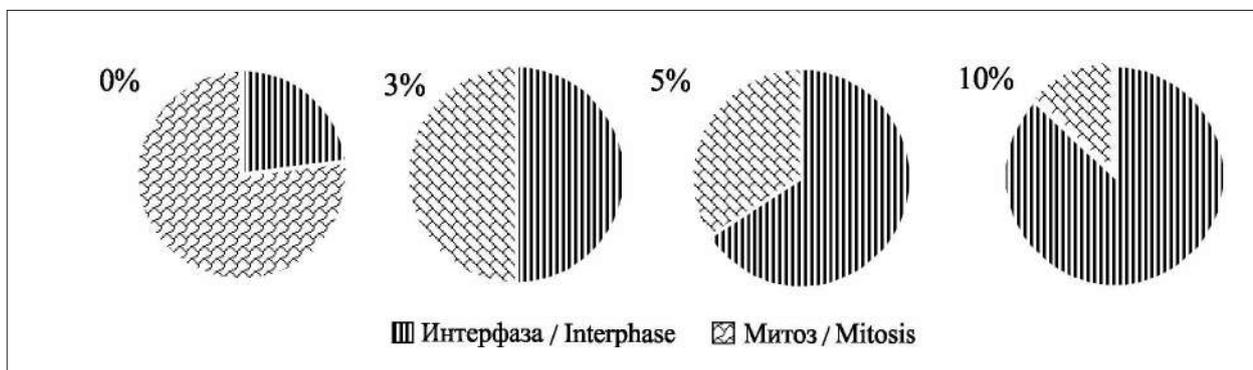


Рис. 4. Частота (%) делящихся клеток и клеток на стадии интерфазы ($n = 99780$) в клетках корневого чехлика кресс-салата
Fig. 4. Frequency (%) of dividing cells and interphase cells ($n = 99780$) in watercress root cap cells

(вытекание карิโอплазмы в цитоплазму клетки). Однако между количеством эритроцитов с микроядрами, и процессами перекисления в тканях, связь, наоборот, отрицательная. Образование микроядер после воздействия свободных радикалов, по мнению авторов исследования, может являться адаптивной реакцией на данный стрессовый фактор [12, 13].

На изменение биохимического статуса клеток человека при действии бензина указано в работе [14], где выявлено нарушение активности различных ферментов, модификация генной активности, возможность ковалентного связывания бензина с ДНК. Изменение интенсивности перекисного окисления липидов, а также активности каталазы обнаружено при действии бензина марки АИ-92 на почвенные цианобактерии [15]. Бензин в высоких концентрациях детерминирует не только повышение активности окислительных ферментов, но и рост содержания фенолов и понижения концентрации хлорофиллов и каротиноидов [16]. Модификация биохимического фенотипа характерна и при действии нефти на двухстворчатых моллюсков [17].

Мутагенное действие бензина может быть результатом как комплекса всех его компонентов, так и отдельных составляющих. Выявлено мутагенное действие летучих фракций нефти [18]. Известен генотоксический эффект бензола, проявляющийся в повышении частоты хромосомных аномалий и снижении митотического индекса у мышей и крыс [19, 20]. Но в культуре клеток человека, в частности, у рабочих автозаправочных станций, наряду с увеличением уровня хромосомных мутаций, зарегистрировано повышение митотического индекса [21, 22].

Уменьшение доли делящихся клеток сопровождается снижением всхожести семян,

скорости ростовых процессов, выживаемости организмов, повышением уровня летальности, что объясняет, например, понижение уровня мутаций при воздействии генотоксикантов в высоких дозах. Такой результат показан при действии бензина АИ-95 [23], а также АИ-92 [24, 25], АИ-80, АИ-96 [25], и, кроме того, при характеристике других токсикантов [26, 27]. Бензин АИ-76, внесённый в образцы почвы в относительно низких концентрациях, стимулирует, а в больших концентрациях ингибирует всхожесть семян и рост сеянцев: *Artemisia diffusa*, *Lolium perenne*, *Festuca rubra maxim*, *Poa pratensis* и *Triticum aestivum* [28].

Уровень изменчивости морфометрических признаков в условиях загрязнения (в определённом диапазоне концентраций) часто повышен, что рассматривают в качестве адаптивной реакции, направленной на выживаемость популяций в изменившихся условиях существования [29]. Но длительное нефтяное загрязнение может детерминировать уменьшение генетического разнообразия, а, следовательно, понижать вероятность формирования устойчивости вида в условиях изменённой окружающей среды [30, 31].

Заключение

Полученные в работе результаты указывают на генотоксичность бензина АИ-95 в отношении кресс-салата *Lepidium sativum* L. Этот эффект проявляется в увеличении частоты хромосомных aberrаций, снижении митотической активности, изменении соотношения фаз митоза. Изменения на генетическом уровне сопровождаются понижением всхожести семян и уменьшением размеров вегетативных органов. Генотоксичность факторов среды расценивают как негативную характеристику,

так как последствием их влияния является увеличение частоты смертности организмов и отклонений в параметрах жизнедеятельности (максимальные при высоких концентрациях). Понижение всхожести семян и торможение роста растений может определять уменьшение массы продуцентов, которое неминуемо отразится на других уровнях пищевой цепи, а, следовательно, приведёт к нарушению функционирования всей экосистемы, что нежелательно как для наземных урбоэкосистем и агроландшафтов, так и водных экосистем.

В редких случаях увеличение скорости мутационного процесса может определить появление положительных мутаций, лежащих в основе эволюционных преобразований адаптивного характера, но вероятность возникновения таких адаптаций крайне низка. Существенные масштабы бензинового загрязнения, с высокой вероятностью сопряжённого с деградацией экосистем, обязывают исследователей искать пути снижения влияния негативного воздействия этого антропогенного фактора.

Литература

1. Ахальцева Л.В., Юрченко В.В., Юрцева Н.А., Конашкина М.А. Оценка генотоксичности пищевого красителя тартразина в микроядерном тесте *in vivo* // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 7. С. 798–801. doi: 10.47470/0016-9900-2022-101-7-798-801
2. Дурнев А.Д. Оценка генотоксичности наночастиц при использовании в медицине // Гигиена и санитария. 2014. Т. 93. № 2. С. 76–83.
3. Калюжная Е.Э., Просеков А.Ю., Волобаев В.П. Генотоксические свойства фторид-иона (обзор литературы) // Гигиена и санитария. 2020. Т. 99. № 3. С. 253–258. doi: 10.33029/0016-9900-2020-99-3-253-258
4. Крюков В.И., Жучков С.А., Лазарева Т.Н., Киреева О.С., Поповичева Н.Н. Влияние КВЧ-излучения на частоту микроядер и ядерных аномалий в эритроцитах личинок амфибий // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2023. № 63. С. 101–112. doi: 10.17217/2079-0333-2023-63-101-112
5. Ловинская А.В., Колумбаева С.Ж., Суворова М.А., Илиясова А.И., Бияшева З.М., Абилев С.К. Комплексное исследование потенциальной токсичности и генотоксичности образцов воды из природных источников пригородной зоны г. Алматы // Экологическая генетика. 2019. Т. 17. № 2. С. 69–81. doi: 10.17816/ecogen17269-81
6. Гостимский С.А., Дьякова М.И., Ивановская Е.В., Монахова М.А. Практикум по цитогенетике. Москва: МГУ, 1974. 327 с.
7. Пухальский В.А., Соловьёв А.А., Бадаева Е.Д., Юрцев В.Н. Практикум по цитологии и цитогенетике растений. Москва: КолосС, 2007. 198 с.

8. Motykiewicz G., Hadnagy W., Seemayer N.N., Szeliga J., Tkocz A., Chorazy M. Influence of airborne suspended matter on mitotic cell division // Mutation Research/ Genetic Toxicology. 1991. V. 260. No. 2. P. 195–202. doi: 10.1016/0165-1218(91)90008-a
9. Боярских И.Г., Куликова А.И. Изменчивость цитогенетических характеристик в популяции *Lonicera caerulea* L. (жимолости синей) в зоне активных разломов // Экологическая генетика. 2017. Т. 15. № 2. С. 62–70. doi: 10.17816/ecogen15262-70
10. Филиппова Г.В., Прокопьев И.А., Шейн А.А. Влияние техногенного пылевого загрязнения на физиологические и цитогенетические характеристики семенного потомства лебеды раскидистой (*Atriplex patula* L.) // Наука и образование. 2015. № 3. С. 89–93.
11. Филиппова Г.В., Шейн А.А., Прокопьев И.А., Филиппов Э.В. Влияние малых концентраций ионов тяжёлых металлов на цитологические характеристики проростков ромашки лекарственной (*Matricaria chamomilla* L.) // Наука и образование. 2016. № 2. С. 102–107.
12. Кузина Т.В., Галактионова М.Л. Анализ взаимосвязи цитогенетического гомеостаза и оксидативного стресса в организме бычковых рыб Северного Каспия // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. № 2. С. 64–72. doi: 10.18470/1992-1098-2018-2-64-72
13. Кузина Т.В., Кузин А. В. Использование маркера оксидативного стресса (МДА) и цитогенетического маркера в системе эколого-генетического мониторинга Северного Каспия // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15. № 1. С. 99–106. doi: 10.18470/1992-1098-2020-1-99-106
14. Ekpnyong C.E., Asuquo A. E. Recent advances in occupational and environmental health hazards of workers exposed to gasoline compounds // International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health. 2017. V. 30. No. 1. P. 1–26. doi: 10.13075/ijomeh.1896.00800
15. Огородникова С.Ю., Зыкова Ю.Н., Березин Г.И., Домрачева Л.И., Калинин А.А. Комплексная оценка состояния цианобактерии *Nostoc paludosum* Kutz. при воздействии различных поллютантов // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 3. С. 47–51. doi: 10.25750/1995-4301-2010-3-047-051
16. Денисова Е.С. Анализ устойчивости и аккумуляционной способности высших водных растений в условиях экологического загрязнения рек нефтепродуктами // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 8–4. С. 553–556.
17. Сухаренко Е.В., Недзвецкий В.С., Кириченко С.В. Биомаркеры нарушений метаболизма двустворчатых моллюсков в условиях загрязнения среды обитания продуктами переработки нефти // Biosystems Diversity. 2017. Т. 25. № 2. P. 113–118. doi: 10.15424/011717
18. Гумарова Ж.Ж., Бигалиев А.Б., Ерубаяева Г.К., Гумарова Л.Ж. Исследование мутагенного действия нефти при хроническом воздействии на лаборатор-

ных животных // Гигиена и санитария. 2012. № 4. С. 69–73.

19. Kiran C. Genotoxicity of benzene in mammalian cells (*Rattus rattus*) and its minimization by medicinal plant extracts and vitamin C // Journal of the Indian Society of Toxicology. 2012. V. 8. No. 1. P. 1–14.

20. Çavuşoğlu K., Yalçın E., Yapar K., Gür B., Çiçek F. The protective role of grape seed extract against chronic toxicity of benzene in swiss albino mice // Cumhuriyet Science Journal. 2014. V. 35. No. 1. P. 1–11.

21. Yadav J.S., Seth N. Cytogenetical damage in petrol pump workers // International Journal of Human Genetics. 2001. V. 1. No. 2. P. 145–150. doi: 10.1080/09723757.2001.11885750

22. El Mahdy N.M., Radwan N.M., Kharoub H.S., El-Halawany F. Chromosomal abnormalities among petrol station workers occupationally exposed to benzene // Current Journal of Applied Science and Technology. 2015. V. 7. No. 5. P. 502–513. doi: 10.9734/bjast/2015/16369

23. Волкова Е.О., Тупицына Л.С., Тупицын С.С., Сальникова Л.И. Всхожесть и морфометрические параметры растительного модельного объекта *Lepidium sativum* L. в условиях лабораторного загрязнения почвы бензином Аи-95 // АгроЭкоИнфо. 2020. № 4 (42). [Электронный ресурс] http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/4/st_405.pdf (Дата обращения: 16.12.2023).

24. Рагимов А.О., Мазиров М.А., Салаякин И.Е., Мазиров И.М. Влияние различных концентраций бензинового загрязнения пахотного горизонта дерново-подзолистой и серой лесной почвы на фитопатогенный потенциал растений различного видового состава // Владимирский земледелец. 2020. № 3 (93). С. 22–29. doi: 10.24411/2225-2584-2020-10127

25. Исаева А.У., Ешибаев А.А., Саданов А.К., Акынова Л.А. Влияние различных фракций нефти на морфометрические параметры растений // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 2. С. 51–54. doi: 10.25750/1995-4301-2008-2-051-54

26. Песня Д.А., Серов Д.А., Вакорин С.А., Прохорова И.М. Исследование токсического, митозмодифицирующего и мутагенного действия борщевика Сосновского // Ярославский педагогический вестник. Естественные науки. 2011. Т. 3. № 4. С. 93–98.

27. Котельникова А.Д., Фастовец И.А., Рогова О.Б., Столбова В.В. Токсичность лантана и церия в условиях биотеста с луком репчатый (*Allium cepa*) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. № 89. С. 54–67. doi: 10.19047/0136-1694-2017-89-54-67

28. Утеулин К.Р. Метод оценки влияния летучего токсичного соединения на растения // Новости науки Казахстана. 2020. № 1. С. 32–41.

29. Казнина Н.М., Титов А.Ф., Лайдинен Г.Ф., Батова Ю.В. Влияние промышленного загрязнения тяжёлыми металлами на морфологические признаки *Phleum pratense* L. // Труды Карельского научного центра РАН. 2009. № 3. С. 50–55.

30. Боронникова С.В., Мандрица С.А., Светлакова Т.Н., Назаров А.В., Суслонов А.В. Изучение генетического разнообразия растений, произрастающих в условиях нефтяного загрязнения почв, с использованием ISSR-маркеров и на примере *Poa pratensis* L. // Экологическая генетика. 2010. Т. 8. № 1. С. 59–63.

31. Девятова Н.М., Бельтюкова Н.Н., Назаров А.В., Суслонов А.В., Светлакова Т.Н. Анализ генетического разнообразия *Poa pratensis* L. в условиях нефтяного загрязнения почв с использованием IRAP-маркеров // Аграрный вестник Урала. 2010. № 2 (68). С. 45–47.

References

1. Akhaltseva L.V., Yurchenko V.V., Yurtseva N.A., Konyashkina M.A. Evaluation of the genotoxicity of the food dye tartrazine in a micronucleus test *in vivo* // Gigiena i sanitariya. 2022. V. 101. No. 7. P. 798–801 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2022-101-7-798-801

2. Durnev A.D. Genotoxicity evaluation of nanoparticles // Gigiena i sanitariya. 2014. V. 93. No. 2. P. 76–83 (in Russian).

3. Kalyuzhnaya E.E., Prosekov A. Yu., Volobaev V.P. Genotoxic properties of fluorines (review) // Gigiena i sanitariya. 2020. V. 99. No. 3. P. 253–258 (in Russian). doi: 10.33029/0016-9900-2020-99-3-253-258

4. Kryukov V.I., Zhuchkov S.A., Lazareva T.N., Kireeva O.S., Popovicheva N.N. Influence of EHF radiation on frequency of micronuclei and nuclear anomalies in amphibian larva erythrocytes // Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2023. No. 63. P. 101–112 (in Russian). doi: 10.17217/2079-0333-2023-63-101-112

5. Lovinskaya A.V., Kolumbayeva S.Z., Suvorova M.A., Iliyassova A.I., Biyasheva Z.M., Abilev S.K. Complex study of potential toxicity and genotoxicity of water samples from natural sources of the suburban zone of Almaty // Ekologicheskaya genetika. 2019. V. 17. No. 2. P. 69–81 (in Russian). doi: 10.17816/ecogen17269-81

6. Gostimsky S.A., Dyakova M.I., Ivanovskaya E.V., Monakhova M.A. Practical work on cytogenetics. Moskva: MGU, 1974. 327 p. (in Russian).

7. Pukhal'skiy V.A., Soloviev A.A., Badaeva E.D., Yurtsev V.N. Practical work on plant cytology and cytogenetics. Moskva: KolosS, 2007. 198 p. (in Russian).

8. Motykiewicz G., Hadnagy W., Seemayer N.N., Szeliga J., Tkocz A., Chorazy M. Influence of airborne suspended matter on mitotic cell division // Mutat. Res. 1991. V. 260. No. 2. P. 195–202. doi: 10.1016/0165-1218(91)90008-a

9. Boyarskikh I.G., Kulikova A.I. Variability of cytogenetic disturbances in *Lonicera caerulea* (blue honeysuckle) population in an active fault zone // Ekologicheskaya genetika. 2017. V. 15. No. 2. P. 62–70 (in Russian). doi: 10.17816/ecogen15262-70

10. Filippova G.V., Prokopyev I.A., Shein A.A. Impact of technogenic dust pollution on the physiological and cytogenetic parameters on the sprawling quinoa (*Atriplex patula* L.) seed progeny // *Nauka i obrazovanie*. 2015. No. 3. P. 89–93 (in Russian).
11. Filippova G.V., Shein A.A., Prokopyev I.A., Filipov E.V. Impact of low heavy metal ions concentrations on the cytological parameters of chamomile seedlings (*Matricaria chamomilla* L.) // *Nauka i obrazovanie*. 2016. No. 2. P. 102–107 (in Russian).
12. Kuzina T.V., Galaktionova M.L. Analysis of the interrelation of cytogenetic homeostasis and oxidative stress in the organism of Goby fish (Gobiidae) of the Northern Caspian // *South of Russia: ecology, development*. 2018. V. 13. No. 2. P. 64–72 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2018-2-64-72
13. Kuzina T.V., Kuzin A.V. Use of oxidative stress (MDA) markers and cytogenetic markers in the ecological-genetic monitoring of the Northern Caspian Sea // *South of Russia: ecology, development*. 2020. V. 15. No. 1. P. 99–106 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2020-1-99-106
14. Ekpenyong C.E., Asuquo A.E. Recent advances in occupational and environmental health hazards of workers exposed to gasoline compounds // *Int. J. Occup. Med. Environ. Health*. 2017. V. 30. No. 1. P. 1–26. doi: 10.13075/ijomeh.1896.00800
15. Ogorodnikova S.Yu., Zykova Yu.N., Berezin G.I., Domracheva L.I., Kalinin A.A. The comprehensive assessment of the state of cyanobacteria *Nostoc paludosum* Kütz. by exposed of various pollutants // *Theoretical and Applied Ecology*. 2010. No. 3. P. 47–51 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-3-047-051
16. Denisova E.S. The research of the higher aquatic plants stability and accumulation ability in the condition of river ecological pollution with oil products // *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2016. No. 8-4. P. 553–556 (in Russian).
17. Sukhareno E.V., Nedzvetskiy V.S., Kirichenko S.V. Biomarkers of metabolism disturbance in bivalve molluscs induced by environmental pollution with processed by-products of oil // *Biosystems Diversity*. 2017. V. 25. No. 2. P. 113–118 (in Russian). doi: 10.15421/011717
18. Gumarova Zh.Zh., Bigaliev A.B., Erubaeva G.K., Gumarova L.Zh. Study of the mutagenic activity of petroleum upon chronic exposure in laboratory animals // *Gigiena i sanitariya*. 2012. No. 4. P. 69–73 (in Russian).
19. Kiran C. Genotoxicity of benzene in mammalian cells (*Rattus rattus*) and its minimization by medicinal plant extracts and vitamin C // *Journal of the Indian Society of Toxicology*. 2012. V. 8. No. 1. P. 1–14.
20. Çavuşoğlu K., Yalçın E., Yapar K., Gür B., Çiçek F. The protective role of grape seed extract against chronic toxicity of benzene in swiss albino mice // *Cumhuriyet Science Journal*. 2014. V. 35. No. 1. P. 1–11.
21. Yadav J.S., Seth N. Cytogenetical damage in petrol pump workers // *International Journal of Human Genetics*. 2001. V. 1. No. 2. P. 145–150. doi: 10.1080/09723757.2001.11885750
22. El Mahdy N.M., Radwan N.M., Kharoub H.S., El-Halawany F. Chromosomal abnormalities among petrol station workers occupationally exposed to benzene // *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2015. V. 7. No. 5. P. 502–513. doi: 10.9734/bjast/2015/16369
23. Volkova E.O., Tupitsyna L.S., Tupitsyn S.S., Salnikova L.I. Germination and morphometric parameters of the plant model object *Lepidium sativum* L. under laboratory soil contamination with AI-95 gasoline // *AgroEkoInfo*. 2020. No. 4 (42) [Internet resource] http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/4/st_405.pdf (Accessed: 16.12.2023) (in Russian).
24. Ragimov A.O., Mazirov M.A. Salyakin I.E., Mazirov I.M. Impact of gasoline contamination various concentration of arable soddy podzolic and grey forest soil on the phytopathogenic potential of plants different species // *Vladimirskiy zemledec*. 2020. No. 3 (93). P. 22–29 (in Russian). doi: 10.24411/2225-2584-2020-10127
25. Isaeva A.U., Yeshibaev A.A., Sadanov A.K., Akyonova L.A. Influence of different oil fractions on plant morphometric parameters // *Theoretical and Applied Ecology*. 2008. No. 2. P. 51–54 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-2-051-54
26. Pesnja D.A., Serov D.A., Vakorin S.A., Prokhorova I.M. Research of the toxic, mitosis modifying and mutagen effect of *Heracleum Sosnowskyi* // *Jaroslavskiy pedagogicheskij vestnik. Estestvennye nauki*. 2011. V. 3. No. 4. P. 93–98 (in Russian).
27. Kotelnikova A.D., Fastovets I.A., Rogova O.B., Stolbova V.V. The toxicity of lanthanum and cerium in conditions of biotest with *Allium cepa* // *Bulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva*. 2017. No. 89. P. 54–67 (in Russian). doi: 10.19047/0136-1694-2017-89-54-67
28. Uteulin K.R. Method for assessing the effect of a volatile toxic compound on plants // *Novosti nauki Kazahstana*. 2020. No. 1. P. 32–41 (in Russian).
29. Kaznina N.M., Titov A.F., Laidinen G.F., Batova Yu.V. Effect of industrial heavy metal pollution of soil on the morphological characteristics of *Phleum pratense* L. // *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*. 2009. P. 50–55 (in Russian).
30. Boronnikova S.V., Mandritsa S.A., Svetlakova T.N., Nazarov A.V., Suslonov A.V. Genetic variability of plants grown on oily soils investigation by the use of ISSR-markers on *Poa pratensis* L. model // *Ekologicheskaya genetika*. 2010. V. 8. No. 1. P. 59–63 (in Russian).
31. Devyatova N.M., Beltyukova N.N., Nazarov A.V., Suslonov A.V., Svetlakova T.N. Analysis of genetic diversity of *Poa pratensis* L. under soils of oil pollution using IRAP-markers // *Agrarnyy Vestnik Urala*. 2010. No. 2 (68). P. 45–47 (in Russian).