

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-2-237-244

EDN: PNEPQN

УДК 577.3:574.2:529.2:632.95

Научная статья / Research article

Эколого-токсикологическая оценка воздействия трифлуралина на *Paramecium caudatum*

О.Д. Калюжная^{ID}✉, Г.В. Польшова^{ID}*Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация*

✉ 1142240104@rudn.ru

Аннотация. Цель исследования — оценка механизмов воздействия трифлуралина на *Paramecium caudatum*. Проблема загрязнения гербицидами водных экосистем достаточно актуальна на сегодняшний день, так как данные вещества попадают с сельскохозяйственных угодий с грунтовыми водами и поверхностным смывом в водоёмы. Трифлуралин является широко используемым гербицидом, который может попадать в водные экосистемы и представлять угрозу для гидробионтов. В ходе эксперимента изучалось влияние трифлуралина в концентрациях: 1,0; 2,5; 5,0; 10,0 и 25,0 мг/л на выживаемость и скорость размножения инфузорий в течение 5 сут. Установлено, что трифлуралин оказывает статистически значимое дозозависимое токсическое действие на *P. caudatum*, начиная с концентрации 2,5 мг/л. При высоких концентрациях (10,0 и 25,0 мг/л) наблюдался эффект острой токсичности (гибель и снижение подвижности), а на 3–5-е сутки – подавление репродуктивной функции (цитостатический эффект). Концентрация 1,0 мг/л была признана недействующей, так как не вызвала статистически значимых отличий от контрольной группы. Результаты свидетельствуют о том, что механизм токсического действия трифлуралина на инфузорий может быть связан с ингибированием клеточного деления. Учитывая низкую растворимость и потенциальную стойкость трифлуралина в воде, его поступление в водоемы может представлять долговременную опасность для водных экосистем. Полученные результаты могут применяться для прогнозирования воздействия трифлуралина на структуру водных экосистем, где простейшие занимают ключевое положение в микробной петле и являются кормовой базой для многих гидробионтов.

Ключевые слова: Анонс к.э., гербициды, инфузории, токсическое действие, пороговая концентрация, выживаемость

Вклад авторов. *Калюжная О.Д.* — подготовка материалов, написание статьи. *Польшова Г.В.* — научное редактирование текста, консультация в формировании концепции исследования. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Калюжная О.Д., Польшова Г.В., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

История статьи: поступила в редакцию 12.09.2025; доработана после рецензирования 20.01.2026; принята к публикации 11.02.2026.

Для цитирования: Калюжная О.Д., Полюнова Г.В. Эколого-токсикологическая оценка воздействия трифлуралина на *Paramecium caudatum* // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 2. С. 237–244. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-237-244> EDN: PNEPQN

Ecological and toxicological assessment of the effect of trifluralin on *Paramecium caudatum*

Olga D. Kalyuzhnaya  , Galina V. Polynova 

RUDN University, Moscow, Russian Federation

 1142240104@pfur.ru

Abstract. The aim of this study is to assess the mechanisms of trifluralin's effect on *Paramecium caudatum*. The problem of herbicide pollution in aquatic ecosystems is highly relevant today, as these substances enter water bodies from agricultural lands via groundwater and surface runoff. Trifluralin is a widely used herbicide that can enter aquatic ecosystems and pose a threat to aquatic organisms. During the experiment, the effect of trifluralin at concentrations of 1,0; 2,5; 5,0; 10,0 and 25,0 mg/L on the survival and reproduction rate of ciliates was studied over 5 days. It was found that trifluralin exerts a statistically significant dose-dependent toxic effect on *P. caudatum*, starting from a concentration of 2,5 mg/L. At high concentrations (10,0 and 25,0 mg/L), acute toxicity effects (mortality and reduced motility) were observed, and on days 3–5, inhibition of reproductive function (a cytostatic effect) was noted. The concentration of 1,0 mg/L was considered non-effective, as it did not cause statistically significant differences compared to the control group. The results indicate that the mechanism of trifluralin's toxic action on ciliates may be associated with the inhibition of cell division. Given the low solubility and potential persistence of trifluralin in water, its entry into water bodies may pose a long-term hazard to aquatic ecosystems. The obtained results can be used to predict the impact of trifluralin on the structure of aquatic ecosystems, where protozoa occupy a key position in the microbial loop and serve as a food source for many aquatic organisms.

Keywords: Announcement c.e., herbicides, infusoria, toxic effect, threshold concentration, survival rate

Authors' contribution. O.D. Kalyuzhnaya — preparation of materials, writing of the article. G.V. Polynova — scientific editing of the text, consultation on the formation of the research concept. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability statement. All data obtained during this study are included in the published article.

Article history: received 12.09.2025; revised 20.01.2026; accepted 11.02.2026.

For citation: Kalyuzhnaya OD, Polynova GV. Ecological and toxicological assessment of the effect of trifluralin on *Paramecium caudatum*. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(2):237–244. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-2-237-244>
EDN: PNEPQN

Введение

Гербициды используются в сельском хозяйстве для уничтожения сорной растительности [1]. Основными источниками попадания гербицидов в водные объекты являются сельскохозяйственные угодья, где они используются для защиты культур от сорных видов. С дождевыми и талыми водами гербициды переносятся в реки, озера и водохранилища [2]. Многие исследования подтверждают опасность гербицидов для водных экосистем [3; 4]. Стойкие гербициды способны накапливаться в организмах и передаваться по пищевой цепи, достигая высших трофических уровней [5].

Действующее вещество гербицида Анонс к.э. (концентрат эмульсии) — трифлуралин [6]. Трифлуралин — это селективный довсходовый динитроанилиновый гербицид, который широко используется для борьбы с однолетними злаковыми и широколиственными сорняками в полевых культурах, обладает высокой летучестью [7; 8].

Paramecium caudatum — одноклеточное ресничное простейшее, обитающее в пресноводных водоемах, легко культивируется в лабораторных условиях. Инфузории (*Paramecium caudatum*) широко используются при оценке токсичности химических веществ [9].

При исследовании воздействия гербицидного препарата Глайсель на инфузорий выявлено, что гербициды вызывают окислительный стресс и ингибирование резистентности у инфузорий, также наблюдались поведенческие изменения, такие как быстрое опорожнение пищевых вакуолей и потеря подвижности [10]. Несмотря на то, что действующее вещество многих гербицидных препаратов — диурон (токсичен для инфузорий только в высоких концентрациях), этот препарат в низких концентрациях может взаимодействовать с карбофураном и повышать его токсичность для инфузорий [11]. Доказано, что сульфонилмочевинные гербициды подавляют рост инфузорий [12]. Тем не менее бис-(2-этилгексил) фталат, дихромат калия, 2,4-дихлорфеноксикусная кислота и паракват стимулируют рост данных организмов [13].

Проведенный эксперимент позволил оценить токсикологическое воздействие трифлуралина на простейших и установить критические уровни загрязнения, что является основой для прогнозирования экологических последствий применения данного гербицида.

Цель исследования — эколого-токсикологическая оценка воздействия трифлуралина на инфузорию *Paramecium caudatum*.

Материалы и методы

Для изучения влияния препарата на выживаемость и размножение простейших в качестве тест-объекта использовали инфузорию-туфельку. Выбор данного вида обусловлен его высокой чувствительностью к токсическим веществам, быстрым темпом размножения, простотой культивирования в лабораторных условиях и статусом классического модельного объекта в эколого-токсикологических и гидробиологических исследованиях. Клеточная мембрана инфузории напрямую контактирует с окружающей средой, делая ее чрезвычайно чувствительной к малейшим изменениям химического состава воды и наличию токсикантов. Инфузория-туфелька упрощает исследование физиологических процессов и эффектов от таких загрязнителей, как минеральное масло, пестициды, металлы и др. [14].

В лаборатории центра «Аквакультуры» МГУТУ им. К.Г. Разумовского нами проводились опыты в течение 5 сут., что соответствует нескольким генерационным циклам инфузорий и позволяет оценить как кратковременные летальные эффекты (выживаемость), так и долговременное воздействие на популяцию (размножение). Все эксперименты были поставлены в 3-кратной повторности для обеспечения статистической достоверности получаемых результатов и минимизации влияния случайных погрешностей.

Исследованию подвергались растворы действующего вещества гербицида Анонс к.э. — трифлуралина, гербицида из класса динитроанилинов, широко применяемого в сельском хозяйстве. Были протестированы следующие концентрации: 1,0; 2,5; 5,0; 10,0 и 25,0 мг/л. В качестве контрольной группы использовались культуры инфузорий, помещенные в стандартную питательную среду без добавления токсиканта. Условия содержания тест-культур (температура, освещенность, аэрация, исходная плотность посадки организмов) стандартизированы и поддерживались постоянными на протяжении всего эксперимента¹.

Ежедневно нами проводился отбор проб и подсчет количества особей в каждой повторности с помощью микроскопа. Регистрировались следующие показатели: выживаемость (%), скорость роста популяции и средняя плотность популяции.

Полученный цифровой материал проанализирован с использованием методов вариационной статистики. Для оценки достоверности различий между опытными и контрольными группами применялся t-критерий Стьюдента для независимых выборок. Уровень статистической значимости различий принимался при $P < 0,05$. На основании анализа установлены недействующая и пороговая концентрации.

¹ ГОСТ Р 57166–2016 Вода. Определение токсичности по выживаемости пресноводных инфузорий *Paramecium caudatum* — Введ. 2017-07-01. Москва : Стандартинформ, 2016. 17 с.

Результаты

Результаты исследований по изучению токсического влияния гербицида Анонс к.э. на простейших представлены в таблице.

Динамика численности (%) инфузорий *Paramecium caudatum* в растворах с различными концентрациями гербицида Анонс к. э., экспозиция 5 суток

Концентрация, мг/л	Экспозиция, дни											
	1			2			4			5		
	* <i>M + m</i>	** <i>t_{st}</i>	%	<i>M + m</i>	<i>t_{st}</i>	%	<i>M + m</i>	<i>t_{st}</i>	%	<i>M + m</i>	<i>t_{st}</i>	%
Конт- роль	10,0 + 0,50	–	100	12,0 + 0,84	–	100	12,0 + 0,84	–	100	12,0 + 0,84	–	100
1,0	10,0 + 0,50	–	100	12,0 + 0,84	–	100	12,0 + 0,84	–	100	12,0 + 0,84	–	100
2,5	8,0 + 0,50	3,10	80	8,8 + 0,78	4,12	73	6,4 + 0,87	4,92	53	6,4 + 0,87	6,31	50
5,0	8,3 + 0,45	2,80	83	8,1 + 0,72	4,42	67	5,7 + 0,84	7,40	47	5,7 + 0,84	7,40	47
10,0	8,0 + 0,50	3,10	80	7,2 + 0,65	4,89	60	3,3 + 0,80	12,8	27	3,3 + 0,80	12,8	27
25,0	3,3 + 0,58	6,41	33	3,2 + 0,40	8,80	27	1,2 + 0,06	26,9	10	0 + 0,00	–	0

Примечание: * *M + m* – средняя численность (экз.) и отклонение от средней; ** *t_{st}* – достоверное отклонение от контроля (*t_{st}* = 2,78, при *P* < 0,05).

Источник: составлено О.Д. Калюжной.

Dynamics of the number (%) of *Paramecium caudatum* infusoria in solutions with different concentrations of herbicide Announcement c. e., exposure for 5 days

Concentration, mg/l	Exposure, day											
	1			2			4			5		
	* <i>M + m</i>	** <i>t_{st}</i>	%	<i>M + m</i>	<i>t_{st}</i>	%	<i>M + m</i>	<i>t_{st}</i>	%	<i>M + m</i>	<i>t_{st}</i>	%
Control	10.0 + 0.50	–	100	12.0 + 0.84	–	100	12.0 + 0.84	–	100	12.0 + 0.84	–	100
1.0	10.0 + 0.50	–	100	12.0 + 0.84	–	100	12.0 + 0.84	–	100	12.0 + 0.84	–	100
2.5	8.0 + 0.50	3.10	80	8.8 + 0.78	4.12	73	6.4 + 0.87	4.92	53	6.4 + 0.87	6.31	50
5.0	8.3 + 0.45	2.80	83	8.1 + 0.72	4.42	67	5.7 + 0.84	7.40	47	5.7 + 0.84	7.40	47
10.0	8.0 + 0.50	3.10	80	7.2 + 0.65	4.89	60	3.3 + 0.80	12.8	27	3.3 + 0.80	12.8	27
25.0	3.3 + 0.58	6.41	33	3.2 + 0.40	8.80	27	1.2 + 0.06	26.9	10	0 + 0.00	–	0

Note: * *M + m* average number (individuals) and deviation from the average; ** *t_{st}* is a significant deviation from the control (*t_{st}* = 2,78, at *P* < 0,05).

Source: compiled by O.D. Kalyuzhnaya.

Данные, представленные в таблице, свидетельствуют о том, что статистически достоверные ($P < 0,05$) отклонения от контроля по показателю численности популяции с первых по пятые сутки эксперимента зарегистрированы в растворах трифлуралина с концентрациями 2,5–25,0 мг/л. Степень угнетения популяции носила выраженный дозозависимый характер, варьируя от 20 % при минимальной концентрации в данном ряду (2,5 мг/л) до практически полного подавления роста культуры (100 %) при концентрации 25,0 мг/л.

В первые 24–48 ч в вариантах с высокими концентрациями (10,0 и 25,0 мг/л) мы наблюдали эффект острой токсичности, выразившийся в гибели части исходной популяции и резком снижении подвижности особей. На 3–5-е сутки действие препарата проявилось в подавлении репродуктивной функции: у выживших инфузорий было заторможено деление, что и привело к значительному отставанию в росте численности по сравнению с контролем. Это указывает на то, что трифлуралин оказывает не только летальное, но и мощное цитостатическое действие. В растворе с концентрацией препарата 1,0 мг/л численность парамеций на всех этапах наблюдения статистически не отличалась от контрольного варианта. Кривые роста популяции были практически идентичны, что указывает как на отсутствие негативного влияния на выживаемость, так и на репродуктивные способности инфузорий. Тем не менее в исследовании воздействия трифлуралина на *Paramecium tetraurelia* замечено подавление роста клеточной культуры (при тестировании в течение 24 ч) в относительно низких концентрациях без ущерба для жизнеспособности клеток [15].

Трифлуралин очень плохо растворяется в воде (0,22 мг/л при 20 °С) и обладает высокой летучестью (давление паров 6,7 мПа при 20 °С), но гербицид подвергается биологическому разложению [16]. Плохая растворимость в воде может вести к долгосрочному воздействию трифлуралина в водной среде.

Заключение

Полученные результаты позволяют предположить, что механизм токсического воздействия трифлуралина на простейших может быть связан с нарушением функций клеточного деления, что согласуется с его известным механизмом действия — ингибирование деления клеток у растений.

На основании установленного порога статистической достоверности воздействия пороговой концентрацией для жизнедеятельности *Paramecium caudatum* в условиях данного эксперимента является концентрация гербицида Анонс к.э. – 2,5 мг/л. Недействующей концентрацией, то есть максимальной концентрацией, не оказывающей статистически значимого эффекта, признана концентрация 1,0 мг/л.

Список литературы / References

- [1] Zhang Y, Hu M, Li A. Review of the occurrence of herbicides in environmental waters of Taihu Lake basin and its potential impact on submerged plants. *Water*. 2024;16(5):726. <https://doi.org/10.3390/w16050726> EDN: NIGFHH
- [2] Hu K, Wang Z, Coleman G, Bender A, Yao T, Zeng S, Song D, Schumann A, Walsh M. Deep learning techniques for in-crop weed recognition in large-scale grain production systems: a review. *Precision Agriculture*. 2023;25:1–29. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10073-1> EDN: VPGHZN
- [3] Böcker T, Möhring N, Finger R. Herbicide free agriculture? A bio-economic modelling application to Swiss wheat production. *Agricultural Systems*. 2019;173:378–92. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.001>
- [4] Krinsky S. Can glyphosate-based herbicides contribute to sustainable agriculture? *Sustainability*. 2021;13(4):2337. <https://doi.org/10.3390/su13042337> EDN: FEBWFM
- [5] Zhou W, Li M, Achal VA. A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage. *Emerging Contaminants*. 2024;11(1):100410. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100410> EDN: UJMANV
- [6] Shadskikh VA, Peshkova VO, Kizhaeva VE., Romanova L.G., Rasskazova O.L. The harmfulness of weeds and chemical methods of dealing with them on soybean crops under irrigation of Saratov Zavolzhye. *Melioration and Water Management*. 2016;(5):27–29. (In Russ.) EDN: WTHTKR
Шадских В.А., Пешкова В.О., Кизаева В.Е. Романова Л.Г., Рассказова О.Л. Вредоносность сорняков и химические методы борьбы с ними на посевах сои в условиях орошения Саратовского Заволжья // Мелиорация и водное хозяйство. 2016. № 5. С. 27–29. EDN: WTHTKR
- [7] Zhang Q, He Z, Wang J. Acute toxicity, oxidative stress, toxicity mechanism, and degradation dynamics of trifluralin in *Eisenia foetida* (Annelida: Lumbricidae). *Journal of Entomological Science*. 2023;58(1):27–46. <https://doi.org/10.18474/JES22-06> EDN: OMFVPE
- [8] Chowdhury IF, Doran GS, Stodart BJ, Chen Ch, Wu H. Trifluralin and atrazine sensitivity to selected cereal and legume crops. *Agronomy*. 2020;10(4):587. <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/4/587#>
- [9] Shadrin IA. Toxicological analysis of some feeds by the survival rate of the ciliate *Paramecium caudatum*. *Bulletin of KSAU*. 2008;(2):128–134. (In Russ.) EDN: ISDFHX
Шадрин И.А. Токсикологический анализ некоторых кормов по реакции выживаемости инфузории *Paramecium caudatum* // Вестник КрасГАУ. 2008. № 2. С. 128–134. EDN: ISDFHX
- [10] Amanchi NR, Busa S, Bandaru V, Shetty PS. Acute toxicity effects of a herbicide, Glycel on freshwater ciliates *Paramecium caudatum*, *Oxytricha fallax* and *Blepharisma intermedium*. *Ecology, Environment and Conservation*. 2023;29(3):1425–1431. <http://doi.org/10.53550/EEC.2023.v29i03.064> EDN: VXHVOM
- [11] Mansano AS, Moreira RA, Dornfeld HC, Freitas EC, Vieira EM, Daam MA, et al. Individual and mixture toxicity of carbofuran and diuron to the protozoan *Paramecium caudatum* and the cladoceran *Ceriodaphnia silvestrii*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020;201:110829. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110829> EDN: ZQADWL
- [12] Kawano T, Kosaka T, Hosoya H. Impact of a sulfonylureic herbicide on growth of photosynthetic and non-photosynthetic Protozoa. In: Lichtfouse E, Schwarzbauer J, Robert D, editors. *Environmental Chemistry: Green Chemistry and Pollutants in Ecosystems*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2005. p. 495–504. https://doi.org/10.1007/3-540-26531-7_45

- [13] Miyoshi N, Kawano T, Tanaka M, Kadono T, Kosaka T, Kunimoto M, et al. Use of *Paramecium* species in bioassays for environmental risk management: Determination of IC50 values for water pollutants. *Journal of Health Science*. 2003;49(6):429–435. <https://doi.org/10.1248/jhs.49.429>
- [14] Badgar K, Prokisch J. Testing Toxicity and Antidote Effect of Selenium Nanoparticles with *Paramecium caudatum*. *Open Journal of Animal Sciences*. 2021;11(4):532–542. <https://doi.org/10.4236/ojas.2021.114036> EDN: JRPIFR
- [15] Pape R, Kissmehl R, Glas-Albrecht R, Plattner H. Effects of anti-microtubule agents on *Paramecium* cell culture growth. *European Journal of Protistology*. 1991;27(3):283–289. [https://doi.org/10.1016/S0932-4739\(11\)80066-0](https://doi.org/10.1016/S0932-4739(11)80066-0)
- [16] Coleman NV, Rich DJ, Tang FHM, Vervoort RW, Maggi F. Biodegradation and abiotic degradation of trifluralin: a commonly used herbicide with a poorly understood environmental fate. *Environmental Science & Technology*. 2020;54(17):10399–10410. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02070> EDN: WKZZZT

Сведения об авторах:

Калюжная Ольга Дмитриевна, аспирант департамента рационального природопользования, Институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 115093, г. Москва, Подольское шоссе, д. 8/5. ORCID: 0009-0008-1615-3665; eLIBRARY SPIN-код: 8329-6999. E-mail: 1142240104@pfur.ru.

Полынова Галина Вячеславовна, кандидат биологических наук, доцент, департамент рационального природопользования, Институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 115093, г. Москва, Подольское шоссе, д. 8/5. ORCID: 0000-0003-0217-5771, eLIBRARY SPIN-код: 5257-1556, Scopus Author ID 55948416400. E-mail: polynova-gv@rudn.ru.

Bio notes:

Olga D. Kalyuzhnaya, Postgraduate Student of the Department of Environmental Management, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, 8/5 Podolskoe shosse, Moscow, 115093, Russian Federation. ORCID: 0009-0008-1615-3665; eLIBRARY SPIN-code: 8329-6999. E-mail: 1142240104@rudn.ru.

Galina V. Polynova, PhD of Biological Science, Associate Professor, Department of Environmental Management, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, 8/5 Podolskoe shosse, Moscow, 115093, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-0217-5771, eLIBRARY SPIN-code: 5257-1556, Scopus Author ID 55948416400. E-mail: polynova-gv@rudn.ru