научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

Издатель
ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

http://ecopri/ru

№ 3 (61). Сентябрь, 2026

Главный редактор
А. В. Коросов

Редакционный совет
В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия
Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugołek
В. Н. Якимов
А. В. Сонина

Службы поддержки
Н. А. Марфицына
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465
Адрес редакции
185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453
E-mail: ecopri@psu.karelia.ru
http://ecopri/ru

12+

© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 574.64:595.324:632.95

МЕЖПОКОЛЕННАЯ ДИНАМИКА РЕПРОДУКТИВНЫХ НАРУШЕНИЙ У *DAPHNIA MAGNA* ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ГЕРБИЦИДОВ: ВЫДЕЛЕНИЕ ТРЕХ ТИПОВ ОТВЕТА

КАЛЮЖНАЯ Ольга Дмитриевна

РУДН им. Патриса Лумумбы, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, kalyuzhnaya.olya@list.ru

Ключевые слова:
Daphnia magna
гербициды
хроническая токсичность
репродукция
межпоколенная динамика
LOEC
NOEC
зоопланктон

Аннотация: Хроническое воздействие гербицидов может нарушать размножение дафний при концентрациях ниже острых летальных уровней. Цель работы – выявить закономерности изменения репродуктивного ответа *Daphnia magna* в ряду поколений P–F3. Исследовали пять препаратов: Зино (метрибузин), Анонс (трифлуралин), Реглон (дикват), Базис (смесь сульфонилмочевин) и Лонтрел (клопиралид). Хронические опыты продолжительностью 21–30 суток проводили в контролируемых лабораторных условиях по ГОСТ 32367-2020. Основным показателем служила фактическая плодовитость; дополнительно учитывали выживаемость, сроки половозрелости, первый помет и число пометов. Для сравнения поколений определяли LOEC и NOEC по репродуктивной продукции. Установлено, что фактическая плодовитость была наиболее чувствительным показателем хронического воздействия. Сопоставление P, F1, F2 и F3 позволило выделить три типа ответа. Первый тип – прогрессирующее усиление эффекта, выявленное для метрибузина, сульфонилмочевин и клопиралида. Второй – нелинейная двухфазная динамика с временной стимуляцией репродукции, установленная для диквата. Третий – отсутствие межпоколенного усиления с ослаблением эффекта в F3, характерное для трифлуралина. Полученные результаты показывают, что однопоколенная оценка может недооценивать хронический риск веществ с усилением или отсроченными эффектами. Межпоколенный подход позволяет дифференцировать вещества по направленности динамики и обосновывать продолжительность хронического тестирования. Практическое значение классификации состоит в возможности выявлять отсроченное усиление риска и отделять его от временного восстановления репродукции. Это важно для выбора продолжительности испытаний и корректной интерпретации экологической опасности гербицидов при оценке природных популяций.

© Петрозаводский государственный университет
©Калюжная О. Д.

Получена: 14 августа 2026 года **Подписана к печати**: 28 сентября 2026 года

Введение

Гербициды являются значимым источником антропогенной нагрузки на поверхностные воды, они поступают в водоемы с поверхностным стоком, при инфильтрации и атмосферном переносе, а их воздействие определяется концентрацией, продолжительностью экспозиции и гидрохимическими условиями (Волгина и др., 2010; Кирейчева, Лентяева, 2020; Stevanovic, Gašić, 2020). Для водных экосистем важны не только летальные, но и сублетальные эффекты, поскольку снижение репродуктивной продукции может изменять численность по-

пуляций быстрее, чем возникает заметная смертность.

Зоопланктон особенно информативен для оценки хронического воздействия. Дафнии занимают ключевое положение в трофических цепях пресных водоемов, а их короткий жизненный цикл позволяет регистрировать изменения репродукции в нескольких поколениях (Ebert, 2022). Исследования показывают, что агрохимикаты способны изменять биомассу и структуру сообществ зоопланктона, а хронические эффекты могут существенно различаться между таксонами (Горбатов и др., 2019; Hébert et al., 2021; Ghosh et al., 2023; Klátyik et al., 2024).

Метрибузин (действующее вещество гербицида Зино) активно применяется в сельском хозяйстве на территории РФ, гербицид в основном используется для защиты томата и пшеницы (Байрамбеков и др., 2011; Голубев, Долженко, 2020). Трифлуралин (действующее вещество гербицида Анонс) является достаточно популярным, используемым во всем мире динитроанилиновым гербицидом, благодаря низкой цене применяется для хлопчатника, пшеницы и масличных культур (Zhang et al., 2023; Ni et al., 2025). Реглон (действующее вещество дикват) эффективен против однолетних двудольных и злаковых сорняков, препарат действует контактно и приводит к усыханию и гибели сорных растений. Препарат также активно применяется как десикант для искуственного подсушивания растений перед уборкой (Москвичев, Агапова, 2022). Базис (римсульфурон + тифенсульфуронметил), как правило, достаточно активно используется в посевах кукурузы на территории РФ (Накаева, 2024; Накаева и др., 2023). Лонтрел (клопиралид) применяется в основном для зерновых культур, сахарной свеклы, льна-долгунца и рапса, как правило, против осота и бодяка (Голубев, Берестецкий, 2021).

Стандартный хронический тест *Daphnia magna* обычно оценивает один репродуктивный цикл. Такой подход позволяет определить LOEC и NOEC, но не показывает, изменяется ли чувствительность потомков при продолжительном воздействии. Межпоколенный анализ особенно важен для веществ, способных вызывать отсроченные или нелинейные эффекты.

Цель исследования – установить закономерности межпоколенной динамики репродуктивных нарушений и выделить типы ответа, различающиеся по направленности изменения эффекта от P к F3.

Материалы

Объектом исследования служила *Daphnia magna* Straus. Для хронических испытаний отбирали одновозрастных самок в возрасте не более 24 ч. Исследовали пять препаратов различных химических классов: Зино с.п. (метрибузин), Анонс к.э. (трифлуралин), Реглон Форте ВР (дикват), Базис СТС (римсульфурон + тифенсульфуронметил) и Лонтрел-300 ВР (клопиралид) (Государственный каталог…, 2025).

Хронические опыты проводили в лабораторных условиях при температуре 18–22 °C и фотопериоде 16 ч света и 8 ч темноты. Использовали отстоянную дехлорированную водопроводную воду и природную фильтрованную воду олиготрофного водоема. Концентрации в хронических опытах составляли: для Зино 0.00001–2.5 мг/л, Анонса 0.0005–1.0 мг/л, Реглона 0.0013–6.5 мг/л, Базиса 0.1–500 мг/л и Лонтрела 10–250 мг/л. Большой разброс используемых концентраций обусловлен разными типами межпоколенной динамики и несовпадением порогов хронического воздействия. Все гербициды различаются по токсичности, т. к. относятся к разным классам. Каждый вариант, включая контроль, испытывали в трех повторностях по 10 одновозрастных самок в каждой (всего 30 особей на концентрацию).

Специальный учет самцов и половой структуры популяции в протокол не входил, все репродуктивные показатели регистрировали для партеногенетических самок. В каждом эксперименте использовали два варианта контроля: чистый контроль (культивационная среда без гербицида и растворителя) и контроль растворителя (среда с растворителем в концентрации, соответствующей максимальной в опытных вариантах). При отсутствии статистически значимых различий между ними данные объединяли и сравнивали с общим контролем; при наличии различий все расчеты LOEC/NOEC проводили относительно контроля растворителя. Это позволяет отделить действие гербицида от влияния носителя, что особенно важно для плохо растворимых соединений, таких как трифлуралин.

Наблюдение проводили в исходном поколении P и трех последовательных поколениях F1, F2 и F3. Продолжительность отдельных хронических экспериментов составляла 21–30 суток. Дафний ежедневно кормили суспензией *Chlorella sp.* и гидролизных дрожжей.

Методы

Хронические опыты проводили в соответствии с ГОСТ 32367-2020. В хронических опытах растворы обновляли в полустатическом режиме с учетом стабильности каждого препарата. Достоверность испытаний контролировали по требованиям к контрольной смертности, репродуктивной продукции и коэффициенту вариации. ГОСТ 32367-2020 ограничен оценкой токсичности за один цикл родительского поколения, что недостаточно для веществ с кумулятивными или эпигенетическими эффектами. Поэтому разработана схема с наблюдением в поколениях P–F3, позволяющая выявить отдаленные последствия, не проявляющиеся в стандартном 21-дневном тесте. Наибольшую информативность экспериментов показывает не только наличие четырех поколений, но и разнообразие классов гербицидных препаратов.

Регистрировали выживаемость родительских особей, день наступления половозрелости, день первого помета, число пометов и реальную плодовитость. Реальную плодовитость определяли как количество выжившей молоди, произведенной одной родительской особью за период наблюдения. LOEC определяли как минимальную концентрацию со статистически значимым отличием от контроля, NOEC – как максимальную концентрацию без такого отличия. NOEC – No Observed Effect Concentration – наибольшая испытанная концентрация, при которой не наблюдается статистически значимого эффекта по сравнению с контролем. LOEC – Lowest Observed Effect Concentration – наименьшая испытанная концентрация, при которой наблюдается статистически значимый эффект по сравнению с контролем.

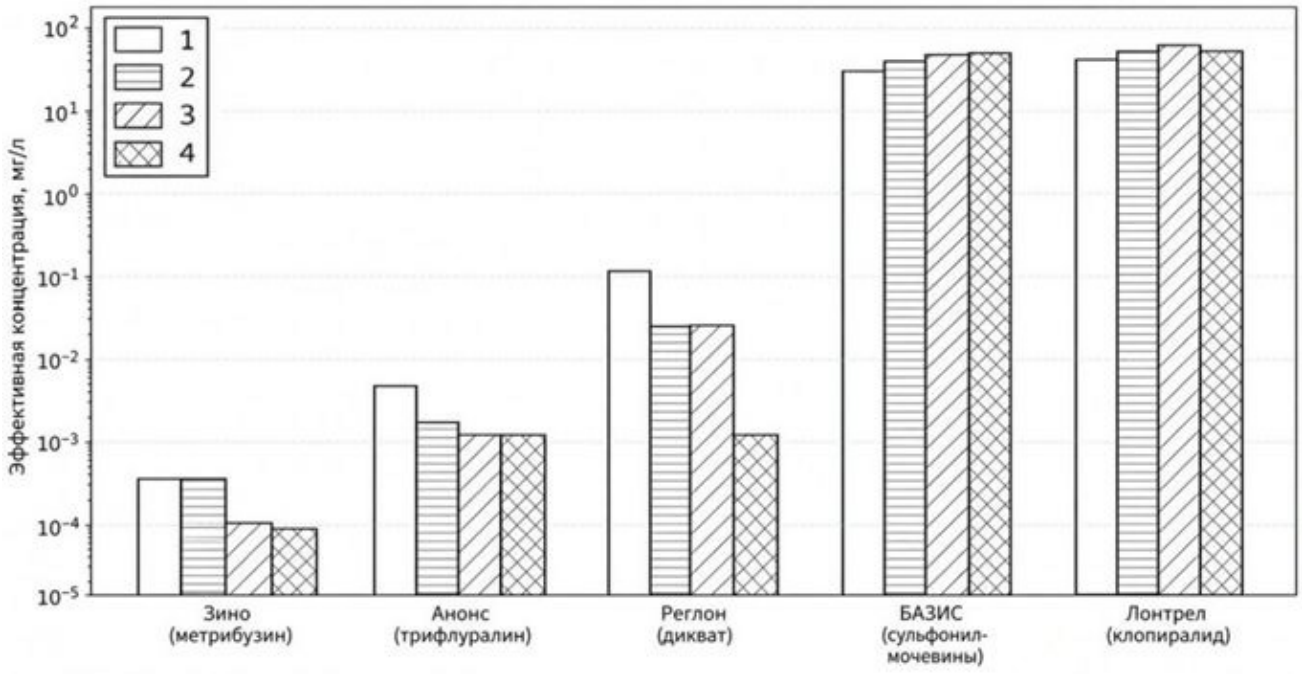
Для выявления статистически значимых отличий между опытными и контрольными группами в пределах одного поколения применяли t-критерий Стьюдента для независимых выборок. При множественных сравнениях (по концентрациям) использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим критерием Даннетта, а для межпоколенных попарных сравнений одной и той же концентрации – t-критерий с поправкой Бонферрони. Перед параметрическими тестами проверяли нормальность распределения (критерий Шапиро – Уилка) и однородность дисперсий (критерий Левене). В случаях нарушения этих условий применяли непараметрический U-критерий Манна – Уитни. Различия считали достоверными при $p < 0.05$.

Результаты

Одним из важнейших результатов исследования является то, что во всех пяти сериях экспериментов фактическая плодовитость оказалась наиболее чувствительным показателем. Например, для метрибузина пороговая концентрация по плодовитости в F2–F3 составляла 0.00005 мг/л, тогда как достоверное снижение выживаемости наблюдалось лишь при 0.001 мг/л (т. е. в 20 раз выше). Для диквата в F1 при 0.013 мг/л плодовитость снижалась на 10.8 %, а выживаемость оставалась на уровне контроля (100 %). Аналогичное соотношение зафиксировано для всех исследованных веществ. Межпоколенная динамика реальной плодовитости представлена на рисунке. Данные даны как средние; стандартные ошибки не превышали 5 % от среднего ($n = 3$).

Анализ четырех поколений *D. magna* (P–F3) показал, что хроническое действие гербицидов не ограничивается дозозависимым снижением плодовитости, а характеризуется тремя устойчивыми типами межпоколенной динамики.

Первый тип – прогрессирующее усиление токсичности (Зино, Базис, Лонтрел): уменьшение пороговой концентрации (LOEC) и нарастание угнетения плодовитости к F3, что, в свою очередь, сопровождается задержкой развития и сокращением числа пометов. Эти данные явно указывают на накопление повреждений или эпигенетические изменения, поэтому четыре поколения для тестирования обязательны. Для метрибузина при концентрации 0.00005 мг/л в исходном поколении (P) реальная плодовитость составила 92.5 ± 2.75 (94.8 % от контроля, $p > 0.05$), в F1 – 90.9 ± 2.34 (94.2 %, $p > 0.05$), однако в F2 она снизилась до 76.8 ± 2.63 (81.9 %, $p < 0.05$), а в F3 – до 71.6 ± 2.30 (81.1 %, $p < 0.05$). Таким образом, LOEC по этому показателю уменьшилась с 0.00025 мг/л (в P и F1) до 0.00005 мг/л (в F2 и F3). Для смеси сульфонилмочевин (Базис) при концентрации 100 мг/л плодовитость в P составляла 81.2 ± 2.8 (81.2 %), в F1 – 78.0 ± 3.0 (78.0 %), в F2 – 73.0 ± 2.9 (73.0 %), в F3 – 68.2 ± 2.7 (68.2 %). Для клопиралида (Лонтрел) при 150 мг/л: P – 80.4±2.5 (67.0 %), F1 – 74.4 ± 2.3 (63.1 %), F2 – 68.4 ± 2.1 (59.0 %), F3 – 61.2 ± 2.0 (53.7 %). Во всех случаях различия достоверны при $p < 0.05$. Сопутствующие эффекты: задержка развития на 1–2 дня, уменьшение числа пометов.



Эффективные концентрации гербицидов в ряде поколений *Daphnia magna:* 1 – исходное (родительское) поколение; 2 – первое дочернее поколение;3 – второе дочернее поколение; 4 – третье дочернее поколение

Effective herbicide concentrations in successive generations of *Daphnia magna:* 1 – parental generation; 2 – first filial generation; 3 – second filial generation; 4 – third filial generation

Второй тип – двухфазная реакция с временной стимуляцией (Реглон): в F1 – угнетение, в F2 – стимуляция плодовитости (на 8–11 %), в F3 – повторное снижение. Эффект маскирует хроническую опасность, создавая ложное впечатление безопасности в F2, поэтому эксперимент необходимо продлевать до F3. При концентрации 0.013 мг/л реальная плодовитость в F1 составила 123.1 ± 3.5 (89.2 % от контроля, $p < 0.05$), в F2 – 149.7 ± 4.1 (110.9 %, $p < 0.05$), а в F3 – 117.5 ± 3.3 (89.0 %, $p < 0.05$). При 0.0013 мг/л в F1 – 138.0 ± 3.4 (100 %, $p > 0.05$), в F2 – 145.8 ± 3.9 (108.0 %, $p < 0.05$), в F3 – 110.9 ± 2.7 (84.0 %, $p < 0.05$). Эти результаты показывают, что временное восстановление неустойчиво и при завершении теста на F2 можно ошибочно подумать о безопасности.

Третий тип – адаптивная стабилизация или ослабление (Анонс): эффект снижается в поколениях, порог повышается к F3, что говорит о включении защитных механизмов. Для этих веществ достаточно стандартного 21-суточного теста. При концентрации 0.001 мг/л реальная плодовитость составляла в P – 129.0 ± 2.8 (87.2 % от контроля, $p > 0.05$), в F1 – 117.0 ± 2.7 (81.8 %, $p < 0.05$), в F2 – 112.0 ± 2.9 (80.6 %, $p < 0.05$), в F3 – 107.0 ± 3.1 (79 3 %, $p > 0.05$). При этом LOEC в P составляла 0.005 мг/л, в F1 и F2 – 0.001 мг/л, а в F3 – снова 0.005 мг/л, т. е. порог в третьем поколении повысился, что указывает на ослабление эффекта, а это, в свою очередь, свидетельствует о включении защитных механизмов и возможном отсутствии кумуляции.

Все значения в тексте представлены как среднее ± стандартная ошибка ($n = 3$). Различия считали достоверными при $p < 0.05$.

При более ранних исследованиях острая токсичность гербицидов ($ЛК_{50}$ за 48 ч) составила: для метрибузина – 0.10 мг/л, трифлуралина – 2.50 мг/л, диквата – 13.0 мг/л, клопиралида – 220.5 мг/л, сульфонилмочевин – 1245.0 мг/л. Разрыв между острой и хронической токсичностью достигает 3–4 порядков, что подтверждает необходимость многопоколенного тестирования.

Обсуждение

Сопоставление четырех поколений показывает, что хронический ответ *D. magna* имеет временную структуру. Одна и та же концентрация может быть недействующей в P, угнетающей в F1, стимулирующей в F2 и снова угнетающей в F3. Поэтому однопоколенная не всегда может быть применима, т. к. недостаточно отражает хроническое воздействие. Тем не менее опыты на трех поколениях дафний описаны в Приказе Росрыбо-

ловства № 695. При коротких опытах (1–3-е поколения) не всегда видны скрытые нарушения. Например, во втором поколении дафнии могут начать размножаться лучше, чем в контроле, что создаст ложное впечатление, т. к. в третьем поколении размножение снова упало. В итоге методика позволяет предсказывать долгосрочный риск для популяций и определять, для каких веществ обязательны четырехпоколенные испытания, тогда как Приказ № 695 дает только формальный порог ПДК без учета сложной динамики. ГОСТ 32367-2020 предписывает использование только одного поколения и не дает углубленной экологической оценки, а также ранжирования веществ по типу хронического воздействия.

При длительном воздействии даже малые концентрации гербицида могут нарушать размножение *D. magna* и передавать эти нарушения потомкам, даже если родительские особи внешне здоровы. В поколении P уже регистрируются достоверные изменения: снижение общей плодовитости, размера кладок, числа пометов за жизнь, а также возможная задержка достижения половой зрелости (Папченкова, 2024; Папченкова и др., 2009).

В первый тип попали метрибузин, сульфонилмочевины и клопиралид. У метрибузина в поздних поколениях снижалась LOEC. У Базиса и Лонтрела при той же концентрации эффект становился глубже. Такая динамика похожа на накопление действия, но в данной работе не изучались механизмы, например, возможные герминативные или эпигенетические эффекты.

Второй тип, установленный для диквата, показывает, насколько важно исследовать четыре поколения. Стимуляция в F2 могла бы быть ошибочно принята за восстановление репродукции, если наблюдение завершалось до F3. Подобные нелинейные реакции требуют осторожной интерпретации и продолженного наблюдения.

Третий тип, характерный для трифлуралина, связан с ослаблением эффекта в F3, что означает отсутствие межпоколенного усиления при исследованных условиях.

Следует отметить, что в контрольных группах наблюдалось закономерное снижение реальной плодовитости от поколения P к F3 (например, для Анонса – с 148.0 ± 2.6 до 135.0 ± 2.0, для реглона – с 140.0 ± 3.5 до 132.0 ± 2.8). Это явление, вероятно, связано с материнским эффектом, накоплением возрастных изменений в культуре или незначительным инбридингом. Однако все сравнения проводились относительно контроля соответствующего поколения, поэтому данное снижение не влияет на оценку токсического эффекта, а лишь подчеркивает необходимость строгого учета поколенческого фона при межпоколенных тестах.

Сопоставление пороговых концентраций по плодовитости с действующими рыбохозяйственными ПДК показывает, что для метрибузина LOEC (0.00005 мг/л) на два-три порядка ниже установленного норматива (0.1 мг/л), тогда как для трифлуралина, диквата, сульфонилмочевин и клопиралида LOEC превышает ПДК в 3–2500 раз. Это означает, что для метрибузина многопоколенный тест выявляет эффекты при концентрациях, которые формально считаются безопасными, а для остальных гербицидов при концентрациях, превышающих нормативные. Такое расхождение подчеркивает необходимость пересмотра подходов к нормированию с учетом межпоколенных эффектов.

Полученные результаты согласуются с общим представлением о том, что хроническая токсичность агрохимикатов для водных организмов может проявляться на сублетальном уровне и различаться между компонентами сообществ (Горбатов и др., 2019; Халиков, 2019; Hébert et al., 2021; Klátyik et al., 2024).

Заключение

При сравнении динамики плодовитости в четырех поколениях сразу было замечено, что вещества ведут себя принципиально по-разному, соответственно выделено три устойчивых типа межпоколенной динамики репродуктивных нарушений у *D. magna* при хроническом воздействии гербицидов. Первый тип (прогрессирующее усиление эффекта) выявлен для метрибузина, сульфонилмочевин и клопиралида. Второй тип (нелинейная двухфазная реакция с промежуточной стимуляцией) характерен для диквата. Третий тип (ослабление эффекта без межпоколенного усиления) установлен для трифлуралина. Самым информативным показателем оказалась фактическая плодовитость. Исследование только реакции одного поколения для веществ первого и второго типов может приводить к недостаточной токсикологической оценке или искажению хронического риска. Благодаря межпоколенному тесту возможно прогнозирование хронических эффектов на популяции, что, в свою очередь, может определять воздействие на экосистемы.

Библиография

Байрамбеков Ш. Б., Валеева З. Б., Корнева О. Г. Метрибузин – универсальный гербицид для защиты томата // Защита и карантин растений. 2011. № 4. С. 39–40.

Волгина Т. Н., Новиков В. Т., Регузова Д. В. Пути распространения пестицидов в объектах окружающей среды // Региональные проблемы. 2010. Т. 13, № 1. С. 76–81.

Голубев А. С., Берестецкий А. О. Перспективные направления использования биологических и биорациональных гербицидов в растениеводстве России (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2021. Т. 56, № 5. С. 868–884.

Голубев А. С., Долженко В. И. Осеннее внесение метрибузина для защиты озимой пшеницы от двудольных и злаковых сорных растений // Земледелие. 2020. № 6. С. 38–40.

Горбатов В. С., Астайкина А. А., Аптикаев Р. С., Тихонов В. В. Сравнительная оценка опасности и риска пестицидов для водных организмов // Агрохимия. 2019. № 11. С. 17–26. DOI: 10.1134/S0002188119110061

ГОСТ 32367-2020. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Определение хронической токсичности для дафний . 2020. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/74005/?ysclid=mu3wctq2ie497367725(дата обращения: 09.07.2026).

Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации / Министерство сельского хозяйства России. 2025. URL: https://base.garant.ru/411841732/ (дата обращения: 09.07.2026).

Кирейчева Л. В., Лентяева Е. А. Влияние сельскохозяйственного производства на загрязнение водных объектов // Природообустройство. 2020. № 5. С. 18–27. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-5-18-27

Москвичев А. Ю., Агапова С. А. Десикация зернобобовых культур как прием совершенствования технологии их возделывания в Волгоградской области // Известия НВ АУК. 2022. № 4 (68). С. 38–45. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-04-04

Накаева А. А. Эффективность гербицида Базис в посевах гибридов кукурузы российской селекции // Научный журнал КубГАУ. 2024. № 202 (08). С. 199–209. DOI: 10.21515/1990-4665-202-017

Накаева А. А., Оказова З. П., Амаева А. Г. Оценка эффективности Базиса в борьбе с сорной растительностью агроценоза кукурузы // International Agricultural Journal. 2023. Т. 66, № 5. DOI: 10.55186/25876740_2023_7_5_12

Папченкова Г. А. Влияние на репродукцию и жизнедеятельность *Daphnia magna* Straus фунгицида пенконазол // Cifra. Биологические науки. 2024. № 4 (4). С. 4–9. DOI: 10.60797/BIO.2024.4.3

Папченкова Г. А., Голованова И. Л., Ушакова Н. В. Репродуктивные показатели, размеры и активность гидролаз у *Daphnia magna* Straus в ряду поколений при действии гербицида «Раундап» // Биология внутренних вод. 2009. № 3. С. 105–110.

Федеральное агентство по рыболовству. Приказ от 4 августа 2009 г. № 695 «Об утверждении Методических указаний по разработке нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» // ГАРАНТ. URL: https://base.garant.ru/2169452/ (дата обращения: 13.08.2026).

Халиков И. С. Определение и трансформация сульфонилмочевинных гербицидов в водной среде // Экологическая химия. 2019. Т. 28, № 2. С. 79–87. DOI: 10.25996/3935.2024.16.45.001

Ebert D. *Daphnia* as a versatile model system in ecology and evolution // EvoDevo. 2022. Vol. 13. No. 1. P. 16. DOI: 10.1186/s13227-022-00199-0

Ghosh T. S., Rana S., Pal P., Mallick B. Herbicidal impacts on freshwater zooplankton // International Journal of Advanced Research Trends in Science. 2023. Vol. 2. No 1. P. 36–41. DOI: 10.70035/ijarts.2023.2136-41

Hébert M. P., Fugère V., Beisner B. E. et al. Widespread agrochemicals differentially affect zooplankton biomass and community structure // Ecological Applications. 2021. Vol. 31. Art. e02423. DOI: 10.1002/eap.2423

Klátyik S., Simon G., Oláh M. et al. Aquatic ecotoxicity of glyphosate, its formulations, and co-formulants: evidence from 2010 to 2023 // Environmental Sciences Europe. 2024. Vol. 36. Art. 22. DOI: 10.1186/s12302-024-00849-1

Ni H., Ye Y., He W. Role of *Bacillus* sp. TF-1 in the degradation and detoxification of Trifluralin // Microorganisms. 2025. Vol. 13. No. 3. Art. 520. DOI: 10.3390/microorganisms13030520

Stevanovic M., Gašić S. Herbicides in surface water bodies – behaviour, effects on aquatic organisms and risk assessment // Pesticides and Phytomedicine. 2020. Vol. 34. No 3-4. P. 157–172.

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. Vol. 58. DOI: 10.18474/JES22-06

Kalyuzhnaya, O. Intergenerational dynamics of reproductive impairment in *Daphnia magna* under chronic herbicide exposure: identification of three types of response. // Principy èkologii. 2026 № 3. P. 106–113. DOI: 10.15393/j1.art.2026.17723

INTERGENERATIONAL DYNAMICS OF REPRODUCTIVE IMPAIRMENT IN *DAPHNIA MAGNA* UNDER CHRONIC HERBICIDE EXPOSURE: IDENTIFICATION OF THREE TYPES OF RESPONSE

KALYUZHNAYA Olga Dmitrievna

RUDN University named after Patrice Lumumba, 6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198 Russia, kalyuzhnaya.olya@list.ru

Key words:
Daphnia magna
herbicides
chronic toxicity
reproduction
intergenerational dynamics
LOEC
NOEC
zooplankton

Summary: Chronic exposure to herbicide can disrupt the reproduction of daphnids at concentrations below acute lethal levels. The aim of this study is to identify patterns of changes in the reproductive response of *Daphnia magna* across generations P-F3. Five commercial herbicides were investigated: Zino (metribuzin), Anons (trifluralin), Reglon (diquat), Basis (a mixture of sulfonylureas), and Lontrel (clopyralid). Chronic tests lasting 21–30 days were conducted under controlled laboratory conditions according to GOST 32367-2020. The main indicator was actual fecundity; in addition, survival rate, age at sexual maturity, the first litter, and the number of litters were taken into account. To compare generations, OEC and NOEC values were determined based on reproductive output. It was found that actual fertility was the most sensitive indicator of chronic exposure. Comparison of P, F1, F2, and F3 made it possible to identify types of response. The first type is a progressive enhancement of the effect, which was identified for metribuzin, sulfonylureas, and clopyralid. The second type is a nonlinear two-phase dynamics with temporal stimulation of reproduction, established for diquat. The third type is the absence of inter-generational enhancement with weakening of the effect in F3, which is characteristic of trifluralin. The obtained results indicate that a single-generation assessment may underestimate the chronic risk of substances with enhanced or delayed effects. The intergenerational approach makes it possible to differentiate substances on the direction of their dynamics and to justify the duration of chronic testing. The practical significance of the classification lies in the ability to identify delayed risk amplification and distinguish it from temporary restoration of reproduction. This is important for choosing the duration of the tests and for correctly interpreting the environmental hazard posed by herbicides when assessing natural populations.

Received on: 14 August 2026 **Published on:** 29 September 2026

References

Bayrambekov Sh. B. Valeeva Z. B. Korneva O. G. Metribuzin – a universal herbicide for tomato protection, Zaschita i karantin rasteniy. 2011. No. 4. P. 39–40.

Ebert D. Daphnia as a versatile model system in ecology and evolution, EvoDevo. 2022. Vol. 13. No. 1. P. 16. DOI: 10.1186/s13227-022-00199-0

Federal Agency for Fisheries. Order No. 695 of August 4, 2009 “On approval of Methodological guidelines for the development of water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in waters of water bodies of fishery importance”, GARANT. URL: https://base.garant.ru/2169452/ (data obrascheniya: 13.08.2026).

Ghosh T. S., Rana S., Pal P., Mallick B. Herbicidal impacts on freshwater zooplankton, International Journal of Advanced Research Trends in Science. 2023. Vol. 2. No 1. P. 36–41. DOI: 10.70035/ijarts.2023.2136-41

Golubev A. S. Beresteckiy A. O. Promising directions for the use of biological and biorational herbicides in crop production in Russia (review), Sel’skohozyaystvennaya biologiya. 2021. T. 56, No. 5. P. 868–884.

Golubev A. S. Dolzhenko V. I. Autumn application of metribuzin for protection of winter wheat from dicotyledonous and grass weeds, Zemledelie. 2020. No. 6. P. 38–40.

Gorbatov V. S. Astaykina A. A. Aptikaev R. S. Tihonov V. V. Comparative assessment of pesticide hazard and risk for aquatic organisms, Agrohimiya. 2019. No. 11. P. 17–26. DOI: 10.1134/S0002188119110061

Hébert M. P., Fugère V., Beisner B. E. et al. Widespread agrochemicals differentially affect zooplankton biomass and community structure, Ecological Applications. 2021. Vol. 31. Art. e02423. DOI: 10.1002/eap.2423

Halikov I. S. Determination and transformation of sulfonylurea herbicides in the water environment, Ekologicheskaya himiya. 2019. T. 28, No. 2. P. 79–87. DOI: 10.25996/3935.2024.16.45.001

Kireycheva L. V. Lentyaeva E. A. The influence of agricultural production on pollution of water bodies, Prirodoobustroystvo. 2020. No. 5. P. 18–27. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-5-18-27

Klátyik S., Simon G., Oláh M. et al. Aquatic ecotoxicity of glyphosate, its formulations, and co-formulants: evidence from 2010 to 2023, Environmental Sciences Europe. 2024. Vol. 36. Art. 22. DOI: 10.1186/s12302-024-00849-1

Methods of testing chemical products hazardous to the environment. Determination of chronic toxicity to daphnids. 2020. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/74005/?ysclid=mu3wctq2ie497367725(data obrascheniya: 09.07.2026).

Moskvichev A. Yu. Agapova S. A. Desiccation of leguminous crops as a technique for improving their cultivation technology in the Volgograd region, Izvestiya NV AUK. 2022. No. 4 (68). P. 38–45. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-04-04

Nakaeva A. A. Okazova Z. P. Amaeva A. G. Evaluation of the effectiveness of Basis in controlling weeds in maize agrocenosis, International Agricultural Journal. 2023. T. 66, No. 5. DOI: 10.55186/25876740_2023_7_5_12

Nakaeva A. A. Efficiency of herbicide Basis in crops of maize hybrids of Russian breeding, Nauchnyy zhurnal KubGAU. 2024. No. 202 (08). P. 199–209. DOI: 10.21515/1990-4665-202-017

Ni H., Ye Y., He W. Role of Bacillus sp. TF-1 in the degradation and detoxification of Trifluralin, Microorganisms. 2025. Vol. 13. No. 3. Art. 520. DOI: 10.3390/microorganisms13030520

Papchenkova G. A. Golovanova I. L. Ushakova N. V. Reproductive parameters, body size and hydrolase activity in Daphnia magna across generations under the action of the herbicide Roundup, Biologiya vnutrennih vod. 2009. No. 3. P. 105–110.

Papchenkova G. A. Effect of the fungicide penconazole on reproduction and vital activity of Daphnia magna Straus, Cifra. Biologicheskie nauki. 2024. No. 4 (4). P. 4–9. DOI: 10.60797/BIO.2024.4.3

State Catalogue of Pesticides and Agrochemicals Approved for Use in the Russian Federation, Ministerstvo sel'skogo hozyaystva Rossii. 2025. URL: https://base.garant.ru/411841732/ (data obrascheniya: 09.07.2026).

Stevanovic M., Gašić S. Herbicides in surface water bodies – behaviour, effects on aquatic organisms and risk assessment, Pesticides and Phytomedicine. 2020. Vol. 34. No 3-4. P. 157–172.

Volgina T. N. Novikov V. T. Reguzova D. V. Ways of distribution of pesticides in environmental objects, Regional'nye problemy. 2010. T. 13, No. 1. P. 76–81.

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. Vol. 58. DOI: 10.18474/JES22-06