

**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ТОКСИКОЛОГИЯ
ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY**

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2025

Демышева А.Д.¹, Савенкова М.С.¹, Кошелева И.С.², Гусев Ю.С.², Плешакова Е.В.¹

Биотестирование водных растворов полифосфата аммония с использованием комплекса тест-организмов

¹ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», 410012, г. Саратов, Российская Федерация;²Саратовский медицинский научный центр гигиены – филиал ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора, 410022, г. Саратов, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Введение. Полифосфат аммония (ПФА) широко применяют в качестве антипирена, удобрения, пищевой добавки и эмульгатора, поэтому изучение его экотоксичности по отношению к водным и почвенным организмам является актуальным.

Материал и методы. В работе приведены результаты оценки токсического действия водных растворов при помощи ПФА в концентрациях 3,5, 17,5 и 35 мг/л, соответствующих 1, 5 и 10 предельно допустимой концентрации (ПДК) в воде для хозяйственно-питьевого водопользования, с помощью комплекса тест-организмов.

Результаты. Установлены видовые различия по воздействию водных растворов ПФА на тест-организмы и дозозависимые эффекты. Водный раствор с концентрацией ПФА 3,5 мг/л не оказывал воздействия на развитие зелёной водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer и на жизнеспособность ветвистых рачков *Daphnia magna* Straus. В то же время наблюдали дозозависимое ингибирование (на 57,6 и 69,3%) роста колонии *C. vulgaris* Beijer при повышении концентрации ПФА в водных растворах до 17,5 и 35 мг/л и гибель *D. magna* Straus (53,3% через 72 ч) при максимальной тестируемой концентрации. Токсическое действие водных растворов, содержащих ПФА во всех исследованных концентрациях, на ряску малую (*Lemna minor* L.) проявилось через 7 сут. экспозиции в виде снижения числа растений и содержания хлорофилла в листьях, увеличения числа корней и листьев.

Ограничение исследования. Применение данных методов исследования возможно только в условиях специально оборудованной лаборатории при наличии квалифицированного персонала.

Заключение. Расширены сведения о токсичности ПФА. Показано токсическое действие его растворов по отношению к водным тест-организмам: *C. vulgaris* Beijer, *D. magna* Straus и *L. minor* L. и отсутствие токсического воздействия на почвенный тест-микроорганизм *Dietzia maris* AM3.

Ключевые слова: полифосфат аммония; экотоксичность; *Dietzia maris* AM3; *Chlorella vulgaris* Beijer; *Daphnia magna* Straus; *Lemna minor* L.

Соблюдение этических стандартов. Протокол с использованием животных (*Daphnia magna* Straus) был одобрен Комитетом по этике научного медицинского центра ФГБОУ ВО «СГУ им. Н.Г. Чернышевского» (протокол № 12 от 23.12.2024 г.).

Для цитирования: Демышева А.Д., Савенкова М.С., Кошелева И.С., Гусев Ю.С., Плешакова Е.В. Биотестирование полифосфата аммония с использованием комплекса тест-организмов. *Токсикологический вестник*. 2025; 33(4): 272–279. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2025-33-4-272-279> <https://elibrary.ru/eetsvl>

Для корреспонденции: Демышева Алина Дмитриевна, e-mail: alia_rosko@mail.ru

Участие авторов: Демышева А.Д. – проведение экспериментальных исследований, написание текста; Савенкова М.С., Кошелева И.С. – проведение экспериментальных исследований; Гусев Ю.С. – дизайн эксперимента, обработка и обсуждение результатов; Плешакова Е.В. – обсуждение результатов, написание текста, редактирование. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила в редакцию: 14 января 2025 / Поступила после исправления: 26 марта 2025 / Принята в печать: 14 июля 2025 / Опубликовано: 29 августа 2025

Alina D. Demysheva¹, Mariya S. Savenkova¹, Irina S. Kosheleva², Yuriy S. Gusev², Ekaterina V. Pleshakova¹

Biotesting of aqueous solutions of ammonium polyphosphate using a complex of test organisms

¹Saratov State University, 410012, Saratov, Russian Federation;²Saratov Hygiene Medical Research Center of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, 410022, Saratov, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Ammonium polyphosphate (APP) is widely used as a fire retardant, fertilizer, food additive and emulsifier, so it is relevant to study its ecotoxicity in relation to aquatic and soil organisms.

Material and methods. The paper presents the results of assessing the toxic effect of aqueous solutions of APP in concentrations of 3.5, 17.5 and 35 mg/L, corresponding to 1, 5 and 10 the maximum permissible concentration (MPC) in water for domestic and drinking water use, using a complex of test organisms.

Results. Species differences in the effects of aqueous solutions of APP on test organisms and dose-dependent effects were established. An aqueous solution with a concentration of 3.5 mg/L APP had no effect on the development of the green algae *Chlorella vulgaris* Beijer and on the viability of the branchial crustaceans *Daphnia magna* Straus. At the same time, dose-dependent inhibition (by 57.6 and 69.3%) of *C. vulgaris* Beijer colony growth was observed with an increase in the concentration of APP in aqueous solutions to 17.5 and 35 mg/L and a death of *D. magna* Straus (53.3 % after 72 h) at the maximum tested concentration. The toxic effect of aqueous solutions containing APP in all tested concentrations on the *Lemna minor* L. appeared after 7 days of exposure in the form of a decrease in the number of plants and the chlorophyll content in the leaves, and an increase in the number of roots and leaves.

Limitations. The use of these methods is possible only in a specially equipped laboratory with qualified personnel.

Conclusion. The data on the toxicity of APP have been expanded. The toxic effect of its solutions on the water test organisms *C. vulgaris* Beijer, *D. magna* Straus and *L. minor* L. and the absence of toxic effects on the soil test microorganism *Dietzia maris* AM3 have been shown.

Keywords: ammonium polyphosphate; ecotoxicity; *Dietzia maris* AM3; *Chlorella vulgaris* Beijer; *Daphnia magna* Straus; *Lemna minor* L

Compliance with ethical standards: Animal (*Daphnia magna* Straus) protocols were approved by the Ethics Committee of the Scientific Medical Center of Saratov State University (protocol No. 12 dated December 23, 2024).

For citation: Demysheva A.D., Savenkova M.S., Kosheleva I.S., Gusev Yu.S., Pleshakova E.V. Biotesting of aqueous solutions of ammonium polyphosphate using a complex of test organisms. *Toksikologicheskyy Vestnik / Toxicological Review*. 2025; 33(4): 272–279. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2025-33-4-272-279> <https://elibrary.ru/eetsvl>

For correspondence: Alina D. Demysheva, e-mail: alia_rosko@mail.ru

Authors' contribution: Demysheva A.D. – conducting experimental studies, writing the text; Savenkova M.S., Kosheleva I.S. – conducting experimental studies; Gusev Yu.S. – design of the study, processing and discussion of the results; Pleshakova E.V. – discussion of the results, writing and editing the text. All co-authors – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study had no sponsorship.

Received: January 14, 2025 / Revised: March 26, 2025 / Accepted: July 14, 2025 / Published: August 29, 2025

Введение

В современном мире широко применяются антипирены — вещества, введенные в материалы или нанесенные на них для подавления реакции возгорания или же препятствующие самому процессу горения, прогрессированию огня и тления [1]. В последние десятилетия в качестве антипирена, благодаря безопасности и экономической эффективности, стал использоваться полифосфат аммония (ПФА), относящийся к классу аммониевых солей линейно-конденсированных полифосфорных кислот с общей химической формулой $(\text{NH}_4)_k\text{H}_{(n+2-k)}\text{P}_n\text{O}_{(3n+1)}$. Он применяется в лакокрасочных материалах, герметиках, технических смазках, клеях, полимерных смолах, термопластичном полиуретане, пенопластах, пенных утеплителях; при изготовлении ДСП, ДВП, фанеры, изоляционных оболочек электрических кабелей, тканей и драпировок для автомобилей [2]. ПФА с низкой степенью полимеризации ($n < 20$) является важным сырьём для производства водорастворимых, хелатных удобрений и удобрений с контролируемым высвобождением. Также ПФА используют в пищевой промышленности в качестве пищевой добавки и эмульгатора (E545), в средствах по уходу за полостью рта, в косметике в качестве буферного агента и ингибитора коррозии, а также при ферментации дрожжевых культур [3].

В почве и осадке сточных вод ПФА распадается на аммиак и фосфаты, в почве аммиак трансформируется в нитрат и нитрит бактериями родов *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* соответственно [4]. На гидролиз ПФА влияют различные факторы, такие как его концентрация и длина цепи, температура, pH, ферменты и ионы металлов в водной среде. Короткоцепочечный ПФА гидролизуетсся с выделением фосфата аммония, периоды полураспада составляют от 1 до 18 сут. [3], длинноцепочечный подвергается медленному гидролизу с периодами полураспада 3,5–12 лет. В водной среде, как фосфаты, так и аммоний служат питательными субстратами для водорослей, растений и микроорганизмов. Персистенция и биоаккумуляция ПФА зависит от длины цепи. При $n > 1000$ ПФА обладает высокой персистентностью и биоаккумуляцией, при $n < 1000$ — наоборот низкой. Предельно допустимая концентрация (ПДК) ПФА в воде для хозяйственно-питьевого водопользования составляет 3,5 мг/л, класс опасности — 4-й (малоопасные вещества)¹. Име-

ются данные, что выброс ПФА в больших дозах может вызвать эвтрофикацию водоёмов, что приводит к сильному цветению воды и представляет серьёзную опасность для выживания водных организмов [5]. ПДК иона аммония в водных объектах рыбохозяйственного значения составляет 0,5 мг/л, фосфат-иона — 0,05, 0,15 и 0,2 мг/л в олиго-, мезо- и автотрофных водоёмах (по фосфору) соответственно².

ПФА не обладает генотоксичностью и канцерогенностью, выявлена его низкая пероральная, ингаляционная и кожная токсичность, слабая нейротоксичность [6]. Сообщалось, что ЛД₅₀ ПФА при пероральном введении крысам >2000 мг/кг; ЛД₅₀ при нанесении на кожу кроликов >2000 мг/кг [7]. Основным проявлением хронической оральной токсичности полифосфатов в высоких концентрациях является кальцификация почек, развивающаяся в результате осаждения фосфата кальция из-за нарушения фосфатного гомеостаза. Высокие дозы ионов аммония, образующихся при гидролизе ПФА, могут вызывать метаболический ацидоз, особенно подвержены риску люди с нарушенной функцией печени.

Несмотря на повсеместное использование ПФА, его экотоксичность мало изучена. Имеются данные о токсичности ПФА для радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*): гибель рыб за 96 ч происходила при ЛД₅₀, равной 123 мг/л. ЛД₅₀- и ЭК₅₀-воздействия водного раствора ПФА в течение 72 ч для пресноводной микроводоросли *Raphidocelis subcapitata* составила более 97,1 мг/л. Показана острая токсичность по отношению к новорождённым рачкам *Daphnia magna*, ЭК₅₀ 48-часового воздействия водного раствора ПФА составила 813 мг/л, ЛД₅₀ по отношению к взрослым особям была >100 мг/л [8].

Актуальным остаётся всестороннее исследование токсичности ПФА как распространённого соединения, используемого в качестве антипирена, удобрения, пищевой добавки и эмульгатора, особенно его экотоксичности по отношению к водным и почвенным организмам.

Цель исследования — оценка токсического действия водных растворов ПФА методом биотестирования с использованием комплекса тест-организмов.

¹ СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»; 2021.

² Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 13.06.2024) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 N 45203.

Материал и методы

В работе использовали ПФА с высокой степенью полимеризации (х.ч., торговый дом «Воткинский завод теплоизоляционных материалов», Россия), применяемый в качестве антипирена. Были приготовлены водные растворы с концентрациями ПФА: 3,5, 17,5 и 35 мг/л, что соответствует 1,5 и 10 ПДК в воде хозяйственно-питьевого назначения.

Для оценки токсичности ПФА использовали: почвенный микроорганизм *Dietzia maris* AM3 (www.collection.ibppm.ru), термофильный штамм одноклеточной зелёной водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer («Европолитест», г. Москва, свидетельство на тест-объект от 01.02.2022 г.), водное растение *Lemna minor* L. (ряска малая) и ветвистоусых рачков *Daphnia magna* Straus («Европолитест», г. Москва, свидетельство на тест-объект от 09.03.2023 г.).

Токсичность ПФА определяли с помощью оригинального метода, основанного на способности дегидрогеназ микроорганизма *Dietzia maris* AM3 восстанавливать за счет дегидрирования бесцветный 2,3,5-трифенилтетразолийхлорид (2,3,5-ТТХ) до темно-красного 2,3,5-трифенилформазана (2,3,5-ТФФ) [9]. К водным растворам ПФА добавляли суспензию тест-микроорганизма *D. maris* AM3, 2,3,5-ТТХ в качестве субстрата для дегидрогеназ и элементы питательной среды: глюкозу, Na_2HPO_4 и MgSO_4 . В контроле не добавляли растворы ПФА. Через 6 сут инкубации в термостате при 28 °С из реакционной смеси экстрагировали ацетоном образовавшийся 2,3,5-ТФФ и экстракт колориметрировали на ФЭКе при $\lambda = 440$ нм. Количество образованного *D. maris* AM3 2,3,5-ТФФ рассчитывали по калибровочной кривой, выражая в мг/мл. При разнице показателей с контролем до 10% растворы ПФА считали нетоксичными, разница в 10-30% указывала на слабую токсичность, от 30 до 50% — на среднюю степень, а выше 50% — на высокую степень токсичности тестируемых растворов ПФА.

Оценку токсичности ПФА с применением в качестве тест-объекта *Chlorella vulgaris* Beijer проводили на комплексе оборудования «Лаборатория биотестирования вод» в соответствии с требованиями ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04³. Тест-культу-

ру водоросли культивировали 22 ч в тестируемых растворах ПФА и в контроле, затем во всех вариантах измеряли оптическую плотность суспензии водоросли на спектрофотометре КФК-3 «ЗОМЗ» при длине волны 565,5 нм. Токсичными считались растворы, вызывающие снижение на 20% и более или увеличение на 30% и более величины оптической плотности тест-культуры водоросли по сравнению с контролем.

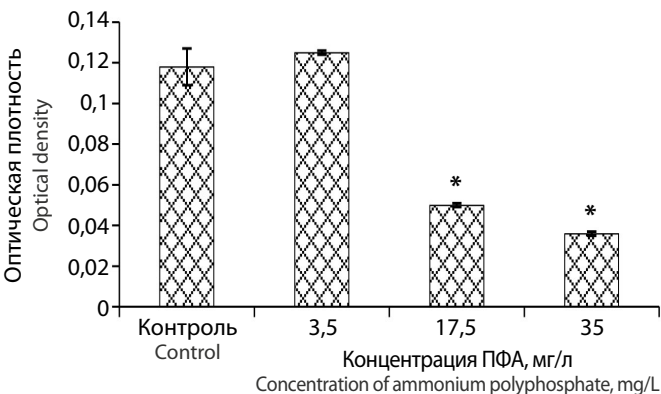
Биотестирование с помощью водного растения ряски малой (*Lemna minor* L.) осуществляли по методике [10] с собственными модификациями. Растения были отобраны из реки Волга в районе пос. Расловка-2, которые в течение 20 сут. были акклиматизированы в лабораторных условиях при комнатной температуре и при достаточной освещённости со сменой воды каждые 3 сут. для удаления продуктов метаболизма. В ходе эксперимента отобранные растения примерно одинаковых размеров, с 3 дочерними листочками культивировали в растворах ПФА. Через 2, 4 и 7 сут. фиксировали морфометрические и ростовые характеристики: среднее число растений (колоний), листочков (суммарный прирост ряски) и корней, размер листочков и корней, также отмечали общее состояние растений, изменение окраски листочков, сравнивая растения в опыте с контрольными растениями. Через 7 сут. определяли суммарное содержание хлорофиллов *a* и *b* фотометрически на спектрофотометре LEKI SS2107UV (Финляндия) по величине поглощения спиртового экстракта при 665 нм и производили пересчет в мг/г.

Исследования на *Daphnia magna* Straus осуществляли в соответствии с требованиями ГОСТ 32536—2013⁴. Дафнии в исследуемых растворах ПФА культивировали 72 ч в устройстве для экспонирования рачков УЭР-03. Учёт смертности дафний в опыте и контроле проводили каждые 24 ч, после их иммобилизации в течение 15 с. При смертности дафний ниже 10% считали, что тестируемые растворы не оказывают острого токсического действия, значение смертности выше 50% свидетельствовало об остром токсическом действии.

Оценку влияния ПФА на указанные тест-объекты проводили в трехкратной повторности. Для описания данных использовали следующие показатели: средняя арифметическая (*M*), ошибка средней арифметической (*m*) и уровень

³ ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04. Токсикологические методы контроля. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. Москва: ФЦАО; 2014.

⁴ ГОСТ 32536—2013. Методы испытания химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Определение острой токсичности для дафний». М.: Стандартинформ; 2014.



Влияние водных растворов ПФА на показатели роста *C. vulgaris* Beijer.

* – достоверно отличается от контроля при $p < 0,05$.

The effect of aqueous solutions of ammonium polyphosphate on the growth rates of *C. vulgaris* Beijer.

* – significantly different from the control at $p < 0.05$.

достоверности (p). Оценку различий между выборками проводили с использованием t -критерия Стьюдента, так как переменные соответствовали нормальному распределению. Уровень достоверности различий считали значимым при $p < 0,05$. Статистическую обработку результатов проводили с помощью программного обеспечения WPS Office 2023 (Kingsoft Office Software Corporation, Сингапур и Statistica 7 (TIBCO Software Inc. 2017, Statsoft, Россия).

Результаты

Известно, что планктонные водоросли являются чувствительными индикаторами токсического воздействия различных веществ, поступающих в воду [11]. В настоящих исследованиях продемонстрировано, что водный раствор с концентрацией ПФА 3,5 мг/л не оказал достоверного воздействия на развитие *C. vulgaris* Beijer (см. рисунок).

Водные растворы с концентрацией ПФА 17,5 и 35 мг/л дозозависимо ингибировали рост клеток хлореллы. Отклонения величины оптической плотности культуры *C. vulgaris* Beijer от контроля составили 57,6 и 69,3% соответственно.

Не было выявлено острого токсического действия растворов с концентрациями ПФА 3,5 и 17,5 мг/л на *D. magna* Straus в 72-часовом эксперименте (табл. 1). В растворе с концентрацией ПФА 35 мг/л через 48 ч культивирования гибель дафний составила 25%, через 72 ч – 53,3%, что указывало на острое токсическое действие.

Оценка дегидрогеназной активности тест-микроорганизма *D. maris* AM3 после воздействия водных растворов ПФА с разными концентрациями показала, что различия по сравнению с контролем составили 4,8 и 9,5% (см. табл. 1). Раствор ПФА с концентрацией 3,5 мг/л стимулировал активность дегидрогеназ *D. maris* AM3 на 4,8% по сравнению с контролем, с концентраци-

Таблица 1 / Table 1

Показатели токсичности водных растворов ПФА по результатам биотестирования на *Dietzia maris* AM3 и *Daphnia magna* Straus

Toxicity indices of aqueous APP solutions based on biotesting with *Dietzia maris* AM3 and *Daphnia magna* Straus

Показатель Indicator	Тест-организм / Test organism							
	Dietzia maris AM3				Daphnia magna Straus			
	Концентрация полифосфата аммония, мг/л / Concentration of ammonium polyphosphate, mg/l							
	Контроль Control	3,5	17,5	37,5	Контроль Control	3,5	17,5	37,5
Концентрация 2,3,5-ТФФ, мг/л Concentration of 2,3,5-triphenylformazane, mg/L	0,105±0,006	0,110±0,013	0,100±0,001	0,095±0,019	–	–	–	–
Смертность, %: Mortality rate, %:								
24 ч / h	–	–	–	–	–	0	0	0
48 ч / h	–	–	–	–	–	0	0	25 ± 0,0
72 ч / h	–	–	–	–	–	0	0	53,3 ± 5,8
Степень токсичности Degree of toxicity	–	Отсутствует Absent	Отсутствует Absent	Отсутствует Absent	–	Отсутствует Absent	Отсутствует Absent	Острая токсичность Acute toxicity

Таблица 2 / Table 2

Показатели биотестирования водных растворов ПФА с помощью *Lemna minor* L.
Biotesting indices of aqueous APP solutions using *Lemna minor* L.

Показатель Indicator	Экспозиция, сут Exposition, day	Контроль Control	Концентрация ПФА, мг/л / APP concentration, mg/L		
			3,5	17,5	37,5
Среднее число растений (колоний), шт. Average number of plants (colonies), pcs.	0	5,0 ± 0,0	5,0 ± 0,0	5,0 ± 0,0	5,0 ± 0,0
	2	5,3 ± 0,6	5,0 ± 0,0	5,0 ± 0,0	5,0 ± 0,0
	4	6,0 ± 1,0	5,3 ± 0,6	5,0 ± 0,0	5,0 ± 0,0
	7	11,3 ± 1,5	6,3 ± 1,2*	6,0 ± 1,5*	5,3 ± 0,6*
Среднее число корней, шт. Average number of roots, pcs.	0	1,1 ± 0,1	1,1 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,1 ± 0,1
	2	1,4 ± 0,2	1,1 ± 0,2	1,7 ± 0,4	2,1 ± 1,7
	4	2,0 ± 0,9	2,2 ± 0,2	2,9 ± 0,5	1,8 ± 0,2
	7	1,8 ± 0,3	3,4 ± 0,5*	4,0 ± 0,8*	3,0 ± 0,3*
Средняя длина корней, см Average root length, cm	0	13,1 ± 4,6	15,3 ± 2,8	18,9 ± 1,2	15,0 ± 3,0
	2	14,7 ± 6,0	12,0 ± 2,5	14,1 ± 5,3	13,3 ± 4,8
	4	10,5 ± 4,3	9,0 ± 1,9	10,1 ± 2,0	10,4 ± 1,7
	7	11,0 ± 1,5	9,3 ± 2,5	7,0 ± 1,7	6,8 ± 1,6
Среднее число листочков, шт. Average number of leaves, pcs.	0	3,0 ± 0,0	3,0 ± 0,0	3,0 ± 0,0	3,0 ± 0,0
	2	3,3 ± 0,9	3,5 ± 0,1	3,9 ± 0,3	3,5 ± 0,2
	4	4,6 ± 2,0	4,7 ± 0,4	5,5 ± 0,6	5,3 ± 0,2
	7	3,1 ± 0,8	6,1 ± 0,9*	6,6 ± 1,1*	6,1 ± 0,9*
Средний размер листочков, см Average size of leaves, cm	0	2,2 ± 0,1	2,7 ± 0,3	3,1 ± 0,3	2,4 ± 0,1
	2	2,8 ± 0,2	3,5 ± 0,2*	3,8 ± 0,2*	3,3 ± 0,3
	4	2,5 ± 0,5	3,7 ± 0,2	3,4 ± 0,3	3,3 ± 0,1
	7	2,8 ± 0,4	2,8 ± 0,2	2,9 ± 0,0	2,5 ± 0,2
Содержание хлорофилла, мг/г Chlorophyll content, mg/g	7	29,24 ± 2,8	13,44 ± 1,6*	18,65 ± 2,5*	20,00 ± 3,1

Примечание. * отличия достоверны для $p < 0,05$.Note. * differences are significant for $p < 0.05$.

ями 17,5 и 35 мг/л, снижал активность дегидрогеназ на 4,8 и 9,5% соответственно. Выявленные различия не превышали 10%, поэтому растворы ПФА считали нетоксичными по отношению к данному почвенному микроорганизму

Результаты биотестирования с использованием *L. minor* L. представлены в табл. 2. Было выявлено, что показатели: среднего числа растений ряски малой, среднего числа корней, средней длины корней и среднего числа листочков через 2 и 4 сут культивирования во всех исследованных водных растворах с ПФА и в контрольном водном растворе достоверно не отличались. Через 2 сут культивирования средний размер листочков достоверно превышал (в 1,3 и 1,4 раза) значение в контроле в вариантах с концентрацией ПФА 3,5 и 17,5 мг/л. Через 7 сут. среднее число растений в растворах с ПФА с концентрациями 3,5, 17,5 и 35 мг/л было в 1,8, 1,9 и 2,1 раза ниже, чем в

контроле соответственно. Среднее число корней *L. minor* L., напротив, было в 1,9, 2,2 и 1,7 раза выше в растворах с ПФА с концентрациями 3,5, 17,5 и 35 мг/л соответственно. Среднее число листочков было выше, чем в контроле, примерно в 2 раза во всех растворах ПФА через 7 сут. экспозиции.

ПФА оказал ингибирующий эффект на содержание хлорофилла в листочках ряски малой. В растворах с ПФА с концентрацией 3,5 и 17,5 мг/л содержание хлорофилла было достоверно ниже, чем в контроле, на 54 и 36% соответственно.

Обсуждение

Отсутствие токсического воздействия водных растворов ПФА в тестируемых концентрациях на почвенный микроорганизм *D. maris* AM3 согласуется с результатами исследований R. Mitkus и соавт., [12], которые не обнаружили цитотоксическое действие моноаминофосфата и диаминофос-

фата аммония на микробные штаммы *Salmonella typhimurium* TA98, TA100, TA1535, TA1537 и *Escherichia coli* WP2 uvrA.

Представители низших ракообразных являются по характеру питания фильтраторами, что делает их чувствительными ко многим загрязняющим веществам, находящимся в водной среде. Концентрация ПФА 35 мг/л вызывала гибель 53,3% рачков через 72 ч, что свидетельствует о проявлении токсического эффекта.

Наблюдаемое снижение роста тест-организма *C. vulgaris* Beijer при культивировании в присутствии повышенных доз ПФА, вероятно, связано с заметным содержанием в нём азота (14–15%) и фосфора (31–32%). Как макроэлемент фосфор необходим для фотосинтеза и роста водорослей, так высокие концентрации фосфора могут привести к прямой физиологической токсичности, сходной, предположительно, с воздействием на высшие растения, приводящим к некрозу и обесцвечиванию листьев, снижению скорости роста и гибели растений [13]. Азот в высоких концентрациях также может быть токсичным и вызывать задержку роста водорослей [14].

Результаты воздействия водных растворов ПФА на тест-объект ряска малая были заметны через 7 сут. Среднее число растений было снижено при всех тестируемых концентрациях ПФА. При этом наблюдали увеличение числа корней и листочков. Результаты биотестирования с использованием *L. minor* L. были сходны с результатами биотестирования с помощью *C. vulgaris* Beijer и с упомянутыми механизмами фитотоксичности избыточной дозы фосфора и азота для растений и водорослей [13, 14]. В отличие от наземных растений, водные растения могут напрямую поглощать NH_4^+ через листья, поэтому погружённые растения могут быть более восприимчивы к избыточной дозе NH_4^+ в воде. Сообщалось, что NH_4^+ в концентрации 10 мг/л или выше снижает

содержание хлорофилла и влияет на фотосинтетическую способность [15].

Ограничение исследования. Применение данных методов исследования возможно только в условиях специально оборудованной лаборатории при наличии квалифицированного персонала.

Заключение

В связи с тем, что ПФА является широко используемым компонентом вспучивающихся антипиренов, а также полимером со значительной промышленной ценностью и перспективами применения, его экотоксикологические свойства должны быть хорошо изучены. Нами были установлены видовые различия по воздействию водных растворов ПФА на тест-организмы. Водные тест-организмы были более чувствительными, чем почвенный микроорганизм, проявлялся дозозависимый характер воздействия:

Водный раствор с концентрацией ПФА 3,5 мг/л не оказал воздействия на развитие *C. vulgaris* Beijer, на жизнеспособность *D. magna* Straus. При концентрации 17,5 мг/л ПФА не оказал острого токсического действия на жизнеспособность *D. magna* Straus, но ингибировал рост клеток *C. vulgaris* Beijer. При концентрации 35 мг/л ПФА гибель *D. magna* Straus составила 53,3%, наблюдали ингибирование роста клеток *C. vulgaris* Beijer.

Максимальная реакция на воздействие водных растворов, содержащих ПФА в тестируемых концентрациях, была зафиксирована у ряски малой через 7 сут. экспозиции. Было снижено число растений, содержание хлорофилла в листочках по сравнению с контрольными растениями, число корней и листочков при этом было повышено.

Максимальную устойчивость к воздействию ПФА проявил почвенный тест-микроорганизм *D. maris* AM3, токсического воздействия на который не обнаружено при всех исследованных концентрациях ПФА.

ЛИТЕРАТУРА

(пп. 1–8, 12–15 см. в References)

- Плешакова Е.В. Разработка нового метода определения токсичности нефтезагрязнённой почвы. Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010; 3: 188–93.
- Ekpea O.D., Chooa G., Barcelobc D., Oh J.-E. Introduction of emerging halogenated flame retardants in the environment. *Comprehensive Analytical Chemistry*. 2020; 88: 1–39.
- Meng L., Li X., Liu M., Li C., Meng L., Hou S. Modified ammonium polyphosphate and its application in polypropylene resins. *Coatings*. 2022; 12(11): 1–17.
- Ji L., Yuan H., Xu D., Yang J., Yuan T., Zhang Z. et al. Precipitation and hydrolysis of water-soluble ammonium polyphosphate on calcite surface depend on the number of P species. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023; 656: 130331.
- Цаценко Л.В., Пасхалиди В.Г. Рясковые как модельный объект в биотестировании водной и почвенной среды. Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2018; 4(176): 146–51.
- Терехова В.А. Биодиагностика и оценка воздействий на окружающую среду. Учебное пособие. Москва: ГЕОС; 2023.
- Grzyb A., Wolna-Maruwka A., Niewiadomska A. The significance of microbial transformation of nitrogen compounds in the light of integrated crop management. *Agronomy*. 2021; 11(7): 1–27.
- Waijers S.L., Kong D., Hendriks H.S., de Wit C.A., Cousins I.T., Westerink R.H.S., et al. Persistence, bioaccumulation, and toxicity of halogen-free flame retardants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2023; 222: 1–71.
- National research council. *Toxicological risks of selected flame-retardant chemicals*. Washington: The National Academies Press; 2000.

REFERENCES

7. Weiner M.L., Salminen W.F., Larson P.R., Barter R.A., Kranetz J.L., Simon G.S. Toxicological review of inorganic phosphates. *Food and Chemical Toxicology*. 2001; 39(8): 759–86.
8. Safety Data Sheet. Ammonium polyphosphate solution. *Nutrien feeding the future*; 2018.
9. Pleshakova E.V. Development of a new method for determining the toxicity of oil-contaminated soil. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010; 3: 188–93. (in Russian)
10. Tsatsenko L.V., Paskhalidi V.G. Lemnaceae as a model object in biotesting the aquatic and soil environment. *Oilseeds. Nauchno-tekhnicheskij byulleten' Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichny'x kul'tur*. 2018; 4(176): 146–51. (in Russian).
11. Terekhova V.A. *Biodiagnostics and environmental impact assessment. Textbook. [Biodiagnostika i ocenka vozdeystvij na okruzhayushchuyu sredu. Uchebnoe posobi.]*. Moscow: GEOS; 2023. (in Russian)
12. Mitkus R., Zhao J., Stanek J. Provisional peer-reviewed toxicity values for ammonium salts of inorganic phosphates: monoammonium phosphate (MAP) (CASRN 7722-76-1) diammonium phosphate (DAP) (CASRN 7783-28-0). Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency; 2021.
13. Beck W.S., Hall E.K. Confounding factors in algal phosphorus limitation experiments. *PLoS One*. 2018; 13(10): 1–19.
14. Salbitani G., Carfagna S. Ammonium utilization in microalgae: A sustainable method for wastewater treatment. *Sustainability*. 2021; 13(956): 1–17.
15. Chen L., Khan S., Long X., Shao F. Effects of the ammonium stress on photosynthesis and ammonium assimilation in submerged leaves of *Ottelia cordata* — an endangered aquatic plant. *Aquatic toxicology*. 2023; 261(1): 106609.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Демешева Алина Дмитриевна — магистрант 1-го курса биологического факультета ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», 410012, г. Саратов, Россия. E-mail: alia_rosko@mail.ru

Савенкова Мария Сергеевна — магистрант 1-го курса биологического факультета ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», 410012, г. Саратов, Россия. E-mail: savenkova.maria.s@yandex.ru

Коселева Ирина Сергеевна — младший научный сотрудник лаборатории химико-биологического мониторинга качества воды Саратовского МНЦ гигиены ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 410022, г. Саратов, Россия. E-mail: irishka-kosheleva@mail.ru

Гусев Юрий Сергеевич — заведующий лабораторией химико-биологического мониторинга качества воды Саратовского МНЦ гигиены ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», кандидат биологических наук, 410022, г. Саратов, Россия. E-mail: yuran1989@yandex.ru

Пешакова Екатерина Владимировна — доктор биол. наук; профессор кафедры биохимии и биофизики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», 410012, г. Саратов, Россия. E-mail: plekat@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alina D. Demysheva — 1st-year Master's student, Faculty of Biology, Chernyshevsky Saratov State University, Saratov, 410012, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0001-8983-4399> E-mail: alia_rosko@mail.ru

Mariya S. Savenkova — 1st-year Master's student, Faculty of Biology, Chernyshevsky Saratov State University, Saratov, 410012, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0003-9237-974X> E-mail: savenkova.maria.s@yandex.ru

Irina S. Kosheleva — Junior Researcher, Laboratory of Chemical and Biological Monitoring of Water Quality, Saratov Hygiene Medical Research Center of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Saratov, 410022, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-1992-5305> E-mail: irishka-kosheleva@mail.ru

Yuriy S. Gusev — Head of the Laboratory of Chemical and Biological Monitoring of Water Quality, Saratov Hygiene Medical Research Center of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Saratov, 410022, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-7379-484X> E-mail: yuran1989@yandex.ru

Ekaterina V. Pleshakova — Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Biochemistry and Biophysics, Chernyshevsky Saratov State University, 410012, Saratov, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-3836-0258> E-mail: plekat@yandex.ru

