

Технология соноплазменной очистки морской воды: эффективность против фармпрепаратов (модельный эксперимент)

© 2025. В. А. Терехова¹, д. б. н., профессор, К. П. Сериков^{1,2}, инженер, бакалавр,

А. Г. Тригуб¹, инженер, М. М. Гладкова¹, м. н. с.,

Ю. Д. Сергеева^{1,2}, аспирант, М. В. Медянкина³, к. б. н., доцент,

А. Ю. Шарова⁴, к. э. н., с. н. с., С. В. Пацаева¹, к. ф.-м. н., доцент,

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1,

²Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова,
119071, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33,

³Московский государственный университет технологий и управления
имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет),
119049, Россия, г. Москва, ул. Шаболовка, д. 14, стр. 9,

⁴Институт Африки РАН,
123001, Россия, г. Москва, ул. Спиридоновка, д. 30/1,
e-mail: vtterekhova@gmail.com

Изучали эффект соноплазменной обработки (СПО) морской воды как способ очистки от фармпрепаратов при моделировании загрязнения антибиотиком тилозином. Влияние СПО на токсичность тилозина в искусственной морской воде до и после обработки соноплазменным разрядом (режим 30 кГц) оценивали с помощью тест-систем, основанных на изменении флуоресценции хлорофилла морской микроводоросли *Phaeodactylum tricornutum* и выживаемости ракообразных *Artemia salina*. Содержание антибиотика оценивали методом спектрофотометрии. Показана эффективность детоксикации тилозина в высокоминерализованной водной матрице при обработке соноплазменным разрядом, которая выражалась в повышении эффективных концентраций ($ЭК_{50}$) тилозина по отношению к морским водорослям на два порядка и увеличению выживаемости артемий на 2–20% в зависимости от концентраций. Разрушение устойчивого в естественных условиях тилозина под влиянием СПО фиксировалось на уровне 25% в морской воде и 46% – в морской воде с добавлением солей питательной среды Гольдберга (в модификации Кабановой).

Ключевые слова: антибиотик, тилозин, очистка воды, соноплазма, токсичность, гидробионты, микроводоросли, ракообразные.

Sonoplasma seawater purification technology: efficiency against pharmaceuticals

© 2025. V. A. Terekhova¹ ORCID: 0000-0001-9121-639X, K. P. Serikov^{1,2} ORCID: 0009-0008-1983-5557

A. G. Trigub¹ ORCID: 0000-0002-6710-6278, M. M. Gladkova¹ ORCID: 0000-0002-0825-2216

Yu. D. Sergeeva^{1,2} ORCID: 0009-0005-3202-6656, M. V. Medyankina³ ORCID: 0000-0002-9195-0399

A. Yu. Sharova⁴ ORCID: 0000-0003-4439-9028, S. V. Patsaeva¹ ORCID: 0000-0002-8407-5020

¹Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119234,

²Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the RAS,
33, Leninskiy prospect, Moscow, Russia, 119071,

³MGUTU named after K.G. Razumovsky,
14, building 9, Shabolovka St., Moscow, Russia, 119049,

⁴The Institute for African Studies,
30/1, Spiridonovka St., Moscow, Russia, 123001,
e-mail: vtterekhova@gmail.com

The relevance of the study is due to the search for effective measures against water pollution. Tests of a new technology for cleaning seawater, previously used for cleaning fresh water, were conducted. The effect of sonoplasmic treatment of

seawater as a method for cleaning from pharmaceuticals was studied when simulating pollution with the antibiotic tylosin. The effect of sonoplasmic treatment on the toxicity of tylosin in seawater before and after single and double treatment with a sonoplasmic discharge (30 kHz mode) was assessed using test systems based on changes in chlorophyll fluorescence of the marine microalga *Phaeodactylum tricornutum* and the survival rate of *Artemia salina* crustaceans. The antibiotic content was determined spectrophotometrically. The efficiency of tylosin detoxification in a highly mineralized water matrix was demonstrated when treated with a sonoplasmic discharge. We detected an increase in effective concentrations (EC_{50}) of tylosin in relation to seaweed by two orders of magnitude and an increase in the survival rate of *A. salina* by 2–20% depending on the concentrations. The destruction of naturally stable tylosin under the influence of sonoplasmic treatment was recorded at a level of 25% in seawater and 46% in seawater with Goldberg medium reagents. The tested technology demonstrates good efficiency of water purification. The destruction of the antibiotic has a positive effect on the growth of algae and the survival rate of *Artemia*. It can be assumed that the modification and destruction of tylosin are due to the accumulation of reactive oxygen species (free radicals, ozone and hydrogen peroxide).

Keywords: antibiotic, tylosin, water purification, sonoplasma, toxicity, aquatic organisms, microalgae, crustaceans.

Фармацевтическое загрязнение Мирового океана становится одной из наиболее острых экологических проблем современности. Значительный рост населения прибрежных районов по всему миру, рост прибрежных мегаполисов и растущая значимость прибрежной аквакультуры во всём мире становятся причиной появления всё большего количества фармацевтических препаратов в морских водах. Основными источниками попадания лекарственных средств в морскую среду являются сточные воды от фармацевтических производств, бытовые стоки, содержащие метаболиты лекарств, неправильная утилизация неиспользованных медикаментов, аквакультура и животноводческие стоки с остатками ветеринарных препаратов [1, 2].

Европейским агентством по оценке лекарственных средств пороговое значение содержания антибиотиков в водной среде установлено на уровне 10 нг/л [3]. В то же время в сточных водах предприятий по производству антибиотиков наблюдалось содержание 32,0 мг/л, что классифицируется как чрезвычайно высокая для санитарно-гигиенических показателей концентрация [3]. Остатки фармацевтических препаратов признаны потенциальной угрозой для водных экосистем в связи с присущей им биологической активностью. Их присутствие в морской среде изучено относительно мало, хотя она является последним приёмником континентального загрязнения. Внедрению экотоксикологических испытаний на чувствительных морских видах придаётся большое значение в мониторинге фармпрепаратов, поскольку они способствуют оценке экологического риска этих соединений для морских экосистем [2].

Содержание препаратов в морской воде зависит от плотности населения в регионе и аквакультурной активности. Китайские учёные в прибрежных водах Бохайского залива обнаружили наличие 21 антибиотика

шести различных групп. При этом в северной части залива Бохай концентрации были выше, чем в южной, где антропогенное воздействие невысоко. Речные сбросы питомников аквакультуры и поверхностных вод ряда рек, впадающих в Бохайский залив, оказались важными источниками загрязнения морской акватории [5].

Растёт число доказательств опасного воздействия антибиотиков на окружающую среду [2, 6–8], включая морские экосистемы [2, 9]. В Европе, Северной Америке и многих других регионах разработано значительное количество комплексных оценок экологического риска. Отмечается, что эмпирических исследований лекарственных препаратов, попадающих в прибрежные и морские экосистемы, проведено сравнительно мало [2].

Негативные последствия загрязнения антибиотиками морских экосистем многообразны. Помимо появления устойчивых к антибиотикам бактерий (что снижает эффективность лекарственных средств), это и нарушение гормонального баланса у рыб и других гидробионтов (связанное со сбоями в работе эндокринной системы, напрямую влияющей на выработку гормонов), накопление препаратов в пищевых цепях, мутации и генетические изменения, снижение репродуктивных функций, ухудшение иммунитета морских организмов и, в конце концов, нарушение экологического баланса водоёмов и угроза для здоровья человека [7].

Ветеринарные антибиотики, в частности, тилозин, относят к наиболее распространённым среди фармпрепаратов загрязнителям природных и сточных вод. Тилозин зачастую применяется не только для лечения [9, 10], но и с целью увеличения массы и темпов роста животных, в том числе в рыбоводческих хозяйствах. Использование тилозина в огромных масштабах в современных отраслях сельскохозяйственного производства, рыбоводстве

и ветеринарии неизбежно ведёт к нарушению устойчивого функционирования природных экосистем путём прямого и косвенного воздействия на виды и сообщества обитателей наземных и водных сред. Внимание к экологическому риску продолжительного накопления тилозина в природных средах всё чаще отражается в публикациях. При исследовании микробоценоза и ферментативной активности чернозёма обыкновенного в условиях модельного загрязнения тилозином (100–600 мг/кг) показан пролонгированный характер его действия, который свидетельствует о значительном нарушении экологических функций почвы и через 120 сут после загрязнения [11].

При фитотестировании воды, загрязнённой тремя разными антибиотиками, показано, что по устойчивости тилозин превосходит цефтриаксон и окситетрациклин [12]. С увеличением продолжительности экспозиции (0, 2, 14, 28, 42 сут) токсичность вышеуказанных антибиотиков возрастала, что свидетельствует об образовании более токсичных продуктов их трансформации [12].

Природная естественная деградация, как и инженерные способы, позволяющие ускорить элиминацию антибиотиков, активно изучаются [4, 10, 13]. Несмотря на это, многие аспекты остаются недостаточно исследованными. В качестве одного из эффективных приёмов разрушения органических поллютантов рассматривают обработку воды соноплазменным разрядом (СПР) [13]. Соноплазменная технология очистки воды основана на комбинации ультразвуковой кавитации и низкотемпературного плазменного разряда (рис. 1, см. цв. вкладку III).

Эффективность работы технологических схем на основе такого инновационного приёма исследуется с целью интегрирования установки в реальное производство для очистки пресной воды замкнутого цикла, в частности, в тепличных и рыбоводческих хозяйствах, для интенсификации процесса выращивания рыбы и получения оборотной воды, пригодной для полива растений [14].

Результаты экспериментального изучения воздействий СПР на морскую воду и эффекты на содержащиеся в ней загрязняющие вещества, представленные фармпрепаратами, неизвестны.

Основная цель нашей работы заключалась в исследовании эффективности соноплазменной обработки (СПО) для очистки высокоминерализованной морской воды, содержащей органические загрязняющие вещества (на примере антибиотика тилозина).

Материалы и методы исследования

Объектом исследования в модельных экспериментах служила искусственная морская вода, приготовленная из морской соли Marine Life salt, производимой компанией Марин Лайф (Marine Life, РФ). Искусственная морская вода имеет следующий состав: хлорид натрия (NaCl) – 22,0 г/дм³, гексагидрат хлорида магния ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) – 9,7 г/дм³, безводный сульфат натрия (Na_2SO_4) – 3,7 г/дм³, безводный хлорид кальция (CaCl_2) – 1,0 г/дм³, хлорид калия (KCl) – 0,65 г/дм³, гидрокарбонат натрия (NaHCO_3) – 0,20 г/дм³ и борная кислота (H_3BO_3) – 0,023 г/дм³.

В качестве модельного загрязняющего вещества был выбран препарат тилозина (Tyl), производимый компанией НИТА ФАРМ (Nita Farm, РФ). Макролидный шестнадцатичленный антибиотик ($\text{C}_{46}\text{H}_{77}\text{NO}_{17}$) продуцируется актиномицетом *Streptomyces fradiae*. Антимикробный механизм действия тилозина заключается в подавлении синтеза бактериальных белков на уровне 50S рибосомальной субъединицы [15]. Целевыми микроорганизмами преимущественно являются грамположительные бактерии, микоплазмы, некоторые простейшие. Для оценки экологической безопасности важно иметь представление о воздействии тилоксина на живые организмы, представляющие разные трофические уровни экосистем. Тилозин испытывали в широком диапазоне концентраций, в том числе заведомо высоких (от 10 до 600 мг/л) с целью более чёткого выявления эффекта СПО.

Соноплазменную обработку проводили на экспериментальной установке, описанной ранее [13]. Система сочетает в себе ультразвуковую кавитацию и низкотемпературный плазменный разряд. Плазма генерировалась непосредственно в водном растворе с помощью переменного напряжения на частоте 30 кГц. Процесс проводился при относительно низких акустических интенсивностях (1,5–3,5 Вт/см²) и расходе воды 12 л/мин. Анализировали влияние однократной обработки СПР.

Эффект очистки морской воды, загрязнённой антибиотиком, оценивали в модельных экспериментах по изменению токсичности тилозина к морским организмам с помощью стандартных биотестов. Токсический эффект водных проб с тилозином измеряли до и после обработки СПР по отношению к водорослям и ракообразным, химическую деградацию антибиотика оценивали с помощью спектрофотометрии.

**В. А. Терехова, К. П. Сериков, А. Г. Тригуб, М. М. Гладкова,
Ю. Д. Сергеева, М. В. Медянкина, А. Ю. Шарова, С. В. Пацаева**
**«Технология соноплазменной очистки морской воды:
эффективность против фармпрепаратов
(модельный эксперимент)». С. 191.**

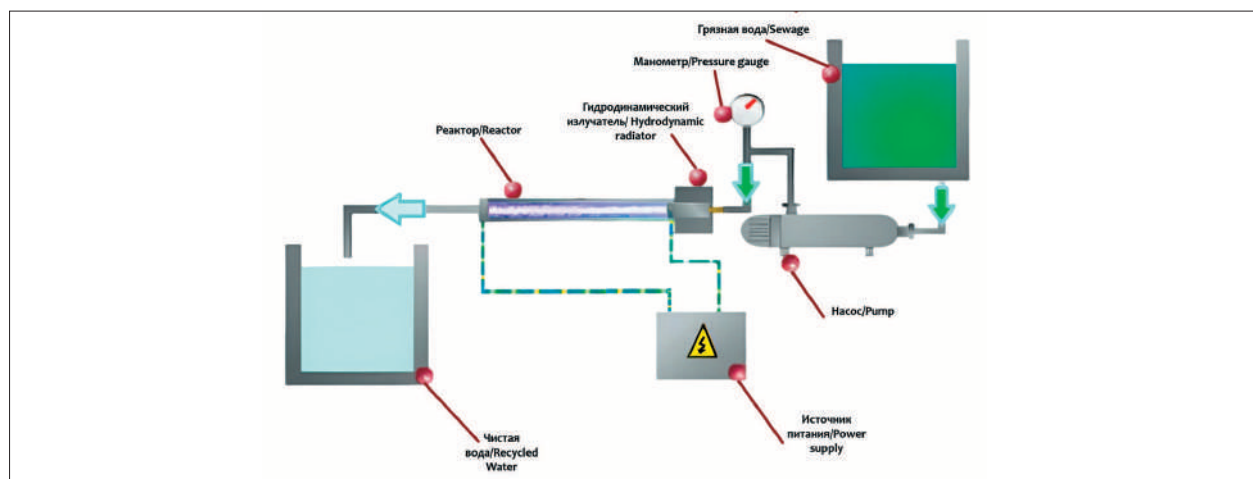


Рис. 1. Схематическое изображение соноплазменной экспериментальной установки [13]
Fig. 1. Schematic representation of the sonoplasma experimental setup [13]

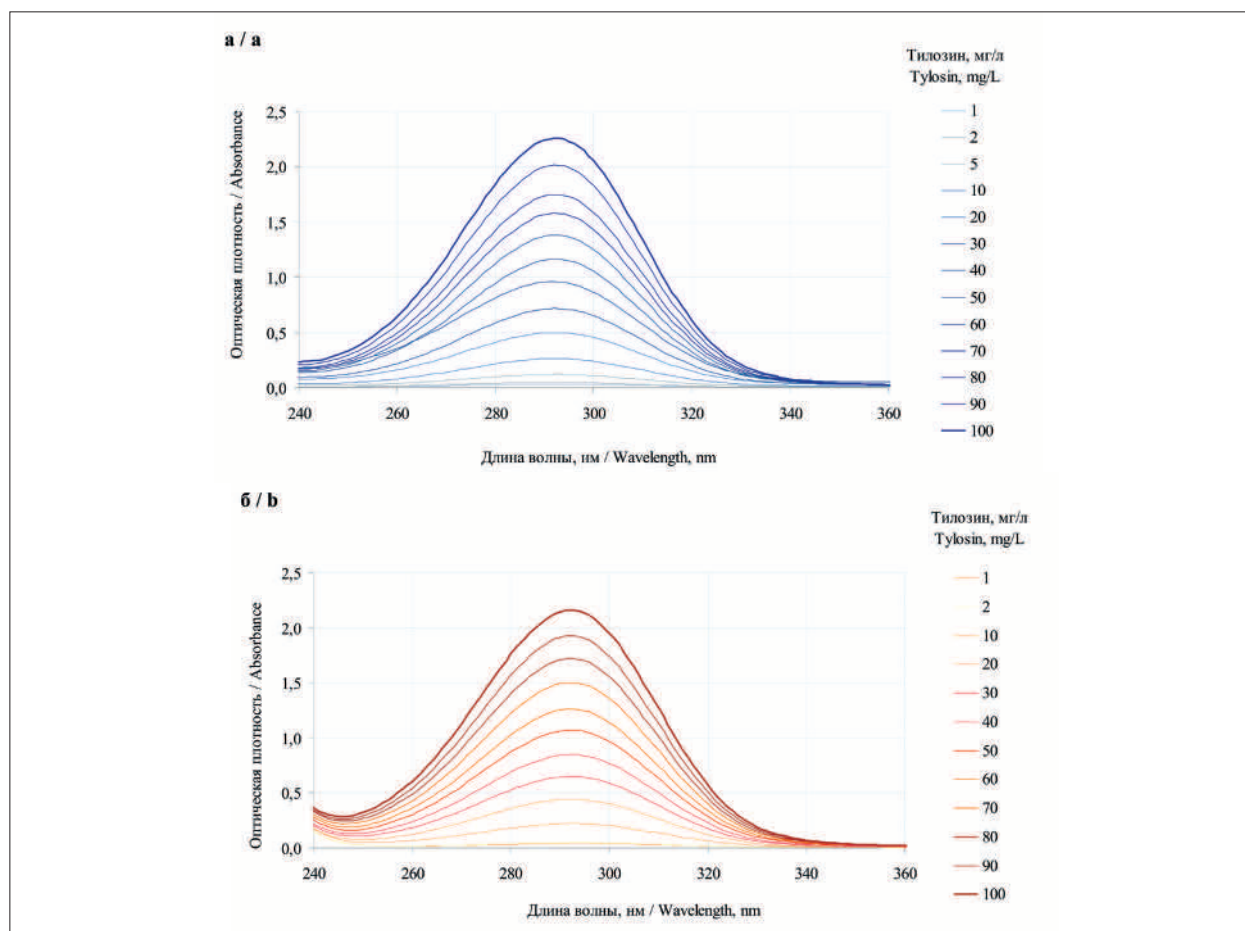
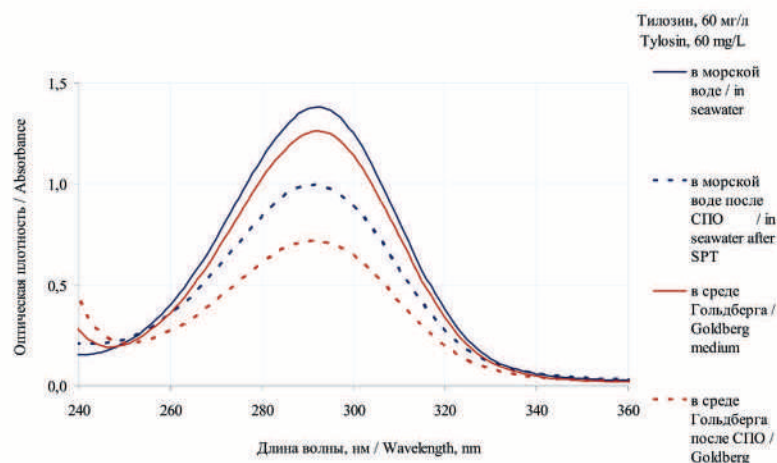


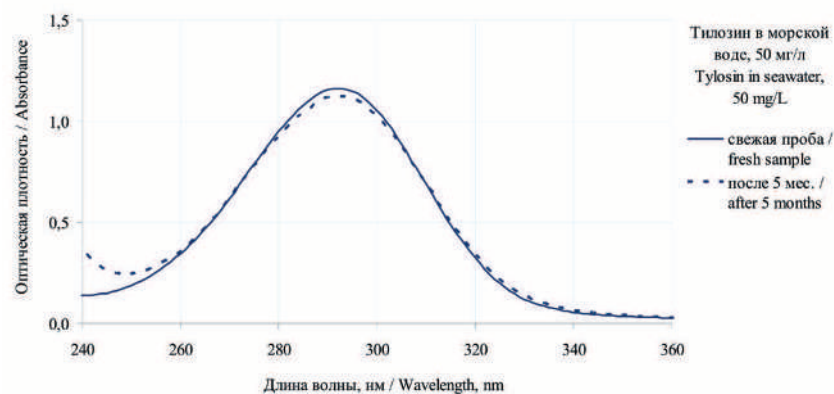
Рис. 2. Спектры поглощения тилозина при концентрации 1–100 мг/л в морской воде (а) и в морской воде со средой Гольдберга (б)
Fig. 2. Absorption spectra of tylosin at concentrations of 1–100 mg/L in seawater (a) and in seawater with Goldberg medium (b)

**В. А. Терехова, К. П. Сериков, А. Г. Тригуб, М. М. Гладкова,
Ю. Д. Сергеева, М. В. Медянкина, А. Ю. Шарова, С. В. Пацаева**
**«Технология соноплазменной очистки морской воды:
эффективность против фармпрепаратов
(модельный эксперимент)». С. 191.**

а / а



б / б



в / в

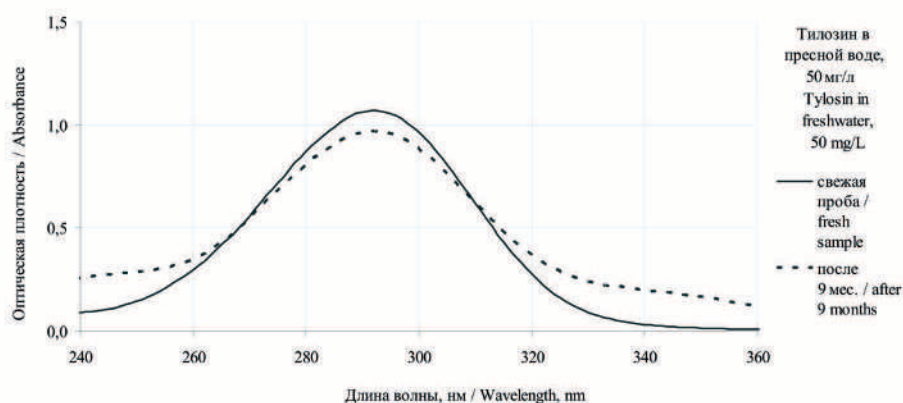


Рис. 5. Спектры поглощения тилозина: (а) в морской воде и морской воде со средой Гольдберга без обработки (сплошные линии) и после СПО (штриховые линии), (б) в морской воде сразу после приготовления пробы и 5 месяцев спустя, (в) в природной пресной воде (с признаками деградации Тил после 9 мес. хранения растворов)

Fig. 5. Absorption spectra of tylosin: (a) in seawater and in seawater with Goldberg medium without treatment (solid lines) and after SPT (dashed lines), (b) in seawater immediately after sample preparation and 5 months later, (c) in natural fresh water (with signs of Tyl degradation after 9 months of storage of solutions)

Таблица 1 / Table 1

Состав питательной среды Гольдберга в модификации Кабановой
Composition of Goldberg's nutrient medium in Kabanova's modification

Маточный раствор /stock solution Навеска реактива, г/100 см ³ дистиллированной воды / Reagent weight, g/100 cm ³ of distilled water	Количество (см ³) каждого исходного раствора на 1 дм ³ морской воды / Volume (cm ³) of each stock solution per 1 dm ³ of seawater
KNO ₃ – 10,1	2
NaH ₂ PO ₄ – 1,421	0,5
MnCl ₂ ·4H ₂ O – 0,01979 + CoCl ₂ ·6H ₂ O – 0,02379	1,0
FeCl ₃ ·6H ₂ O – 0,02703	1,0

Водоросли. Для оценки изменения токсичности морской воды с тилозином на фитопланктонные виды использовали альгологически чистую культуру одноклеточных водорослей *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin.

Водоросли культивировали на морской воде с добавлением маточных растворов среды Гольдберга в модификации Кабановой (табл. 1).

Условия культивирования и проведения экспериментов: искусственное освещение лампами дневного света с интенсивностью 2000–3000 лк, при естественной смене дня и ночи; температуре +20±2 °С (согласно «Руководству по определению методом биотестирования токсичности вод, донных отложений, загрязняющих веществ и буровых растворов», утверждённого МПР РФ 27.04.2001 г.).

Для биотестов брали водоросли в экспоненциальной стадии роста (через 3 сут после посева). Опыты проводили в колбах объёмом 100 см³, содержащих по 50 см³ морской воды со средой Гольдберга в модификации Кабановой. В опытные варианты тилозин добавляли в концентрациях (мг/л): 10, 50, 100, 300 и 600; контрольные варианты – без добавления антибиотика. Повторность трёхкратная. В начале эксперимента плотность клеток водорослей в суспензии – 50 тыс. кл./мл. Длительность опыта составляла 7 сут. Влияние тилозина на водоросли оценивали по изменению флуоресценции с помощью анализатора «Флюорат 02-5М» («Люмекс», РФ) при длине волны 670 нм, длина оптического пути 1 см.

Артемии. В биотестах с планктонными беспозвоночными использовали особи эвригаллиного жаброногого рачка *Artemia salina* L., полученного из цист в лаборатории. Артемий содержали в искусственной морской воде соленостью 20‰.

Условия культивирования и проведения экспериментов: освещение искусственное, 3000 лк, продолжительность светового дня 12 ч; температура +20±2 °С. В опыте брали науплиев артемий в возрасте 24 ч. Опыты про-

водили в бюксах объёмом 50 мл. Плотность посадки рачков – 5 особей на 10 мл воды. Повторность в опыте и контроле четырёхкратная. Длительность эксперимента составляла 72 ч.

Спектральные измерения. Содержание антибиотика в водной среде оценивали спектрофотометрическим методом. Спектры поглощения измеряли с помощью спектрофотометра ПЭ-5400УФ («Экротех», Россия) в спектральном диапазоне 200–500 нм с шагом 1 нм. Пробы помещали в кварцевые кюветы с длиной оптического пути 1 см, измерения проводили относительно соответствующей водной среды без антибиотика (дистиллированной воды, морской воды или морской воды с солями среды Гольдберга). Полоса поглощения тилозина находится в УФ диапазоне в границах от 245 до 360 нм с максимумом поглощения при 290 нм. На рисунке 2 (см. цв. вкладку III) показаны спектры поглощения тилозина в концентрациях 1–100 мг/л в морской воде и в морской воде с солями среды Гольдберга.

Концентрацию тилозина определяли по значению оптической плотности в максимуме полосы поглощения (D_{\max}) с помощью предварительно полученных калибровочных зависимостей для каждой среды (рис. 3).

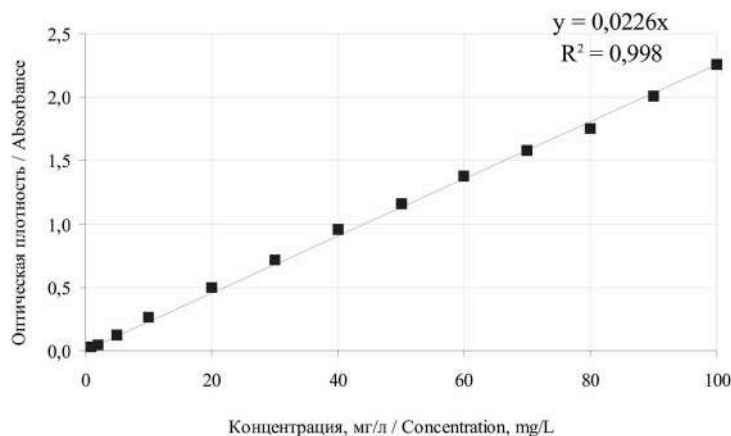
Расчёт концентрации тилозина (С) проводили по формуле:

$$C \text{ (мг/л)} = D_{\max}/A,$$

где А – коэффициент пропорциональности в зависимости оптической плотности в максимуме полосы поглощения тилозина от концентрации. Для морской воды А=0,0226 л/мг, для морской воды со средой Гольдберга А=0,0215 л/мг.

Статистическую обработку и визуализацию данных получали с помощью пакета программ Excel, сканирование спектров поглощения проводили в программном обеспечении SC5400.

а / a



б / b

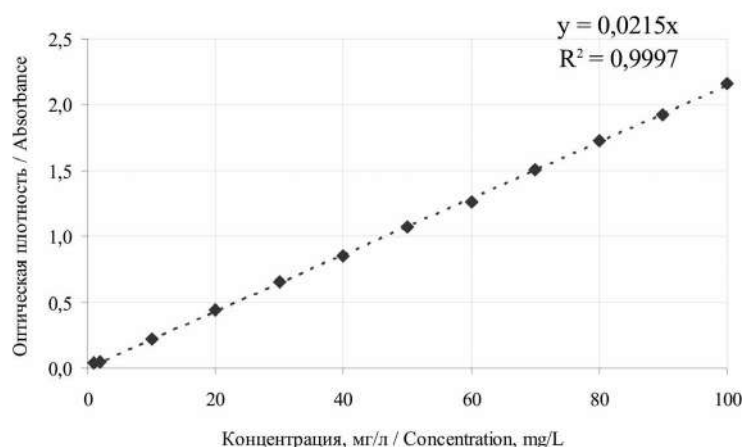


Рис. 3. Зависимость оптической плотности от концентрации тилозина в максимуме полосы поглощения в морской воде (а) и в морской воде со средой Гольдберга (б)
Fig. 3. Dependence of the optical density on the tylosin concentration at the maximum of the absorption band in seawater (a) and in seawater with Goldberg medium (b)

Результаты и обсуждение

Влияние СПО на токсичность тилозина по отношению к морским водорослям. Тилозин по отношению к водорослям оказывал ярко выраженный токсический эффект. Снижение флуоресценции клеток морской водоросли *Ph. tricornutum* уже при 10 мг Tyl/л было выше 60% (табл. 2).

Расчётным методом с помощью пробит анализа установлена полуэффективная концентрация ($ЭК_{50}$) антибиотика. Концентрация, приводящая к снижению интенсивности флуоресценции клеток водорослей на 50%, составила $ЭК_{50} \text{ Tyl} = 7,0$ мг/л.

После обработки СПР среды с тилозином практически во всех концентрациях наблюдали увеличение уровня флуоресценции хлорофилла морской водоросли относительно кон-

троля. Лишь в концентрации 50 мг/л было незначительное снижение флуоресценции (на 3,8%). Согласно полученным данным, полуэффективная концентрация тилозина по отношению к *Ph. tricornutum* после СПО многократно возросла: $ЭК_{50} \text{ Tyl} > 600$ мг/л (табл. 2).

Влияние СПО на токсичность тилозина по отношению к рачкам артемиям. Ракообразные оказались менее чувствительными к тилозину, чем водоросли. Даже при максимальной из испытанных концентраций (600 мг/л) выживаемость рачков была выше 50%. Тем не менее, и в этой тест-системе была заметна эффективность СПО воды. Наблюдения в динамике за выживаемостью артемий в морской воде (20 ‰) показали, что уже через 48 ч заметно снижение числа погибших рачков после воздействия СПР:

Таблица 2 / Table 2

Влияние соноплазменной обработки (СПО) на токсичность тилозина по отношению к водоросли *Ph. tricornutum* в морской воде со средой Гольдберга (20 ‰) / Effect of sonoplasma treatment (SPT) on the toxicity of tylosin towards algae *Ph. tricornutum* in seawater with Goldberg medium (20 ‰)

Концентрация тилозина в среде Гольдберга, мг/л / Tylosin concentration in Goldberg medium, mg/L	До СПО / Before SPT		После СПО / After SPT	
	флуоресценция, % к контролю / fluorescence, % to control	ЭК ₅₀ Tyl = 7,0 мг/л / EC ₅₀ Tyl = 7.0 mg/L	флуоресценция, % к контролю / fluorescence, % to control	ЭК ₅₀ Tyl > 600 мг/л / EC ₅₀ Tyl > 600 mg/L
0 (контроль / control)	100,00		100,0	
10	38,70		100,8	
50	0,50		96,2	
100	0,40		106,1	
300	0,40		106,8	
600	0,40		105,3	

Примечание: ЭК₅₀ Tyl – полуэффективная концентрация тилозина.
Note: EC₅₀ Tyl – semi-effective concentration of tylosin.

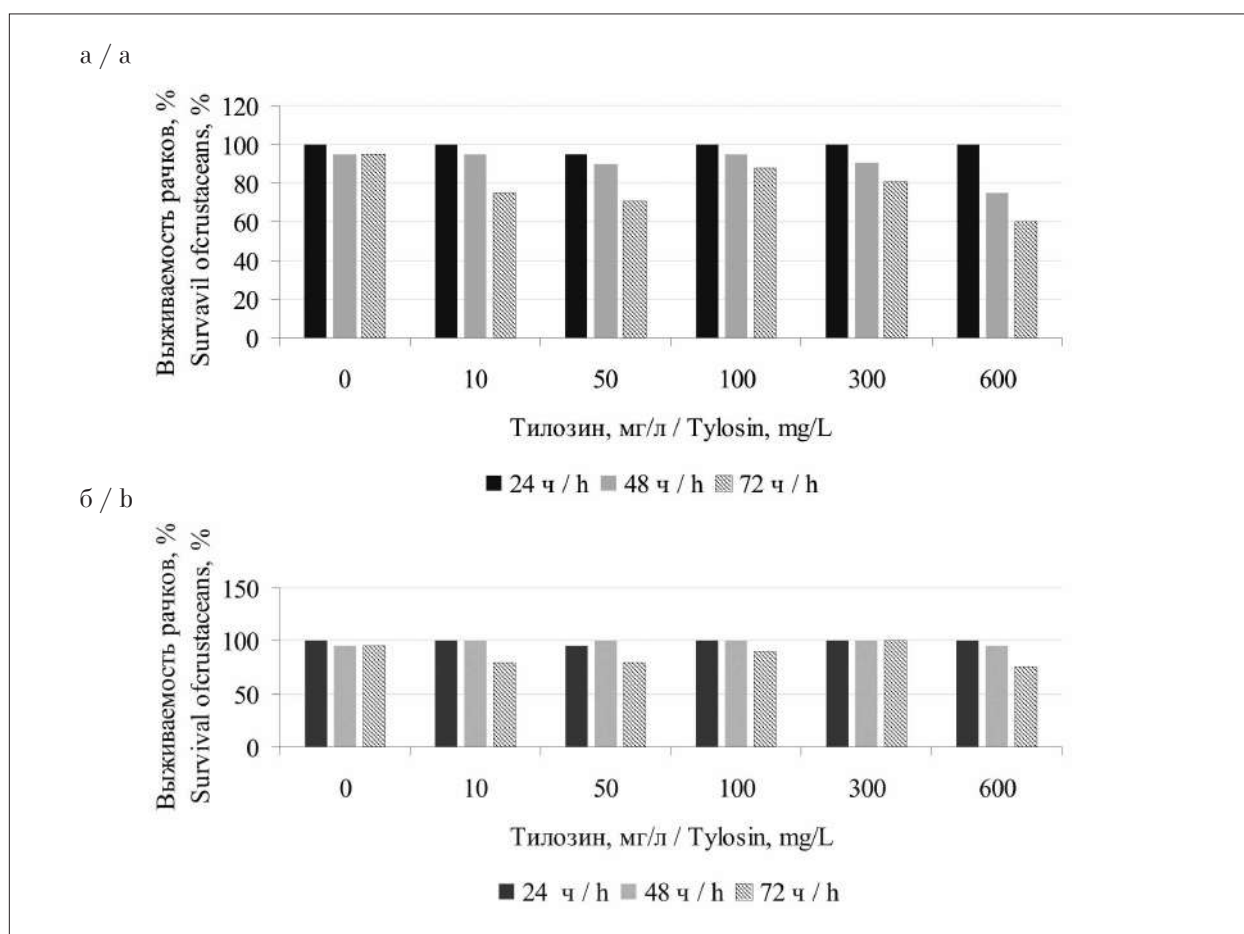


Рис. 4. Выживаемость рачков *Artemia salina* (%) в пробах морской воды с тилозином до СПО (а) и после СПО (б)
Fig. 4. Survival of *Artemia salina* crustaceans (%) in seawater samples with tylosin before (a) and after (b) sonoplasma treatment

на 5–20% – в пробах с 10–300 мг TyI/л, и на 20% – с 600 мг TyI/л (рис. 4).

К окончанию срока экспозиции (через 72 ч) в биотест-системе различия в числе погибших рачков в исходной среде и после обработки СПР составили от 2% (при 100 мгTyI/л) до 19% (при 300 мгTyI/л). Очистка морской воды с помощью СПО способствовала снижению токсичности тилозина по отношению не только к водорослям, но и к ракообразным.

Спектрофотометрическое определение содержания тилозина до и после СПО, а также в результате хранения образцов. С помощью спектрофотометрии показано, что СПО способна снизить содержание TyI на 25% в морской воде и на 46% в морской воде с солями среды Гольдберга. Спектральные кривые чётко характеризуют распределение концентраций тилозина как в пресной, так и солёной воде, и позволяют судить о степени деградации тилозина (рис. 5, см. цв. вкладку IV).

Нами впервые получены данные о практически полной сохранности антибиотика TyI в морской воде по истечении 5 месяцев при хранении в закрытых пластиковых бутылках в темноте при комнатной температуре 18–20 °C (рис. 5б). По предварительным данным, небольшая часть (около 12%) тилозина деградировала через 9 месяцев при тех же стационарных условиях хранения в пресной природной воде. Об этом свидетельствует уменьшение оптической плотности в максимуме полосы поглощения тилозина и увеличение поглощения по краям полосы (рис. 5в).

С учётом этих фактов можно утверждать, что с помощью СПО можно эффективно очищать воду от плохо деградируемого антибиотика тилозина. Испытанный режим СПО дает хорошие показатели очистки воды. Разрушение антибиотика положительно влияет на рост численности клеток водорослей, что проявляется в повышении флуоресценции проб, и на выживаемость рачков артемий. Учитывая накопленный опыт анализа результатов физико-химической обработки пресной воды с применением СПР, можно полагать, что причиной модификации и разрушения тилозина и в морской воде служит накопление активных форм кислорода (свободные радикалы, озон, перекись водорода) [16–18].

Заключение

Обработка СПР разрушает антибиотик тилозин в морской воде солёностью 20‰ и

положительно влияет на рост численности клеток водорослей, что фиксировалось по увеличению флуоресценции хлорофилла. Доля погибших рачков в обработанной СПР морской воде с тилозиом заметно снижалась по сравнению с необработанной. Снижение токсичности тилозина при использовании СПО обусловлено комбинацией биохимических, химических и физических процессов, которые могут действовать одновременно. Соноплазменная обработка морской воды способствует одномоментному разрушению тилозина (минимум на 25%), что проявляется в снижении его токсичности, и не влияет на пригодность воды для гидробионтов.

Дальнейшие испытания режимов обработки воды и детальное изучение механизма действия СПР может способствовать повышению эффективности данной технологии очистки вод от органических и других видов в загрязняющих агентов.

Статья подготовлена в рамках проекта «Проект “Чистая вода” как важнейшая составляющая сотрудничества РФ со странами Глобального Юга: социально-экономическое и технологическое измерения» по гранту Министерства науки и высшего образования РФ на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития (Соглашение № 075-15-2024-546).

Авторы благодарят магистров МГУ Андрея Шулакова и Михаила Ломоносова за помощь в выполнении работ, сотрудников ИОНХ им. Н.С. Курнакова РАН А.В. Камлер и Р.В. Никоннову за содействие в проведении экспериментов.

Литература

1. Gaw S., Thomas K.V., Hutchinson T.H. Sources, impacts and trends of pharmaceuticals in the marine and coastal environment // Philos. Trans. R Soc. Lond. B Biol. Sci. 2014. V. 369. No. 1656. Article No. 20130572. doi: 10.1098/rstb.2013.0572
2. Branchet P., Arpin-Pont L., Piram A., Boissery P., Wong-Wah-Chung P., Doumenq P. Pharmaceuticals in the marine environment: What are the present challenges in their monitoring? // Sci. Total Environ. 2022. V. 766. Article No. 142644. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142644
3. Антропова Н.С., Ушакова О.В., Водянова М.А. Савостикова О.Н. Риск распространения антибиотикорезистентности через объекты окружающей среды и продукты питания (обзорная статья) // Russian Journal of Rehabilitation Medicine. 2020. № 4. С. 36–51.
4. Zhang F., Wang J., Tian Y., Liu C., Zhang S., Cao L., Zhou Y., Zhang S. Effective removal of tetracycline an-

tibiotics from water by magnetic functionalized biochar derived from rice waste // *Environ. Pollut.* 2023. V. 330. Article No. 121681. doi: 10.1016/j.envpol.2023.121681

5. Zou S., Xu W., Zhang R., Tang J., Chen Y., Zhang G. Occurrence and distribution of antibiotics in coastal water of the Bohai Bay, China: impacts of river discharge and aquaculture activities // *Environ. Pollut.* 2011. V. 159. No. 10. P. 2913–2920. doi: 10.1016/j.envpol.2011.04.037

6. Ажогина Т.Н., Скугорева С.Г., Аль-Раммахи А.А., Гненная Н.В., Сазыкина М.А., Сазыкин И.С. Влияние загрязнителей на распространение генов устойчивости к антибиотикам в окружающей среде // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 3. С. 6–14. doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-006-014

7. Sazykin I.S., Seliverstova E.Yu., Khmelevtsova L.E., Azhogina T.N., Kudrevskaya E.M., Khammami M.I., Gnennaya N.V., Al-Rammahi A.A.K., Rakin A.V., Sazykina M.A. Occurrence of antibiotic resistance genes in sewages of Rostov-on-Don and lower Don River // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 4. P. 76–82. doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-076-082

8. Bielen A., Šimatović A., Kosić-Vukšić J., Senta I., Ahel M., Babić S., Jurina T., Plaza J.J., Milaković M., Udiković-Kolić N. Negative environmental impacts of antibiotic-contaminated effluents from pharmaceutical industries // *Water Res.* 2017. V. 126. P. 79–87. doi: 10.1016/j.watres.2017.09.019

9. Ojemaye C.Y., Petrik L. Pharmaceuticals in the marine environment: a review // *Environmental Reviews*. 2019. V. 27. No. 2. P. 51–165. doi: 10.1139/er-2018-0054

10. Yuan Q., Sui M., Qin C., Zhang H., Sun Y., Luo S., Zhao J. Migration, transformation and removal of macrolide antibiotics in the environment: a review // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2022. V. 29. No. 18. P. 26045–26062. doi: 10.1007/s11356-021-18251-22

11. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Одабашян М.Ю. Николаева К.Н. Экологическая оценка воздействия антибиотика тилозина на биологические свойства чернозёма обыкновенного // *Наука. Инновации. Технологии*. 2015. № 1. С. 186–202.

12. Чеснокова С.М., Савельев О.В. Оценка устойчивости антибиотиков различных групп в водной среде методом биотестирования // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020. № 9 (99). С. 101–109. doi: 10.23670/IRJ.2020.99.9.018

13. Abramov V.O., Abramova A.V., Cravotto G., Nikonov R.V., Fedulov I.S., Ivanov V.K. Flow-mode water treatment under simultaneous hydrodynamic cavitation and plasma // *Ultrason. Sonochem.* 2021. V. 70. Article No. 105323. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105323

14. Федосеева Е., Сергеева Ю., Волкова В., Акулова А., Камлер А., Никонов Р., Шарова А., Терехова В. Воздействие соноплазменной обработки воды на бактериально-грибной комплекс микроорганизмов, типичных для тепличных хозяйств // *Экология и про-*

мышленность России. 2025. Т. 29. № 7. С. 8–12. doi: 10.18412/1816-0395-2025-7-8-12

15. McCoy L.S., Xie Y., Tor Y. Antibiotics that target protein synthesis // *Wiley Interdiscip. Rev. RNA*. 2011. V. 2. No. 2. P. 209–232. doi: 10.1002/wrna.60

16. Пискарев И.М., Иванова И.П., Самоделкин А.Г., Иващенко М.Н. Иницирование и исследование свободно-радикальных процессов в биологических экспериментах: монография. Н. Новгород: ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА, 2016. 140 с.

17. Foster J.E. Plasma-based water purification: challenges and prospects for the future // *Phys. Plasmas*. 2017. V. 24. Article No. 055501. doi: 10.1063/1.4977921

18. Abramov V., Abramova A., Bayazitov V., Kameneva S., Veselova V., Kozlov D., Sozarukova M., Baranchikov A., Fedulov I., Nikonov R., Cravotto G. Fast degradation of tetracycline and ciprofloxacin in municipal water under hydrodynamic cavitation/plasma with CeO₂ nanocatalyst // *Processes*. 2022. V. 10. Article No. 2063. doi: 10.3390/pr10102063

References

1. Gaw S., Thomas K.V., Hutchinson T.H. Sources, impacts and trends of pharmaceuticals in the marine and coastal environment // *Philos. Trans. R Soc. Lond. B Biol. Sci.* 2014. V. 369 (1656). P. 20130572. doi: 10.1098/rstb.2013.0572

2. Branchet P., Arpin-Pont L., Piram A., Boissery P., Wong-Wah-Chung P., Doumenq P. Pharmaceuticals in the marine environment: What are the present challenges in their monitoring? // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 766. Article No. 142644. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142644

3. Antropova N.S., Ushakova O.V., Vodyanova M.A., Savostikova O.N. Risk of antibiotic resistance extension via environmental objects and food products (review) // *Russian Journal of Rehabilitation Medicine*. 2020. No. 4. P. 36–51 (in Russian).

4. Zhang F., Wang J., Tian Y., Liu C., Zhang S., Cao L., Zhou Y., Zhang S. Effective removal of tetracycline antibiotics from water by magnetic functionalized biochar derived from rice waste // *Environ. Pollut.* 2023. V. 330. Article No. 121681. doi: 10.1016/j.envpol.2023.121681

5. Zou S., Xu W., Zhang R., Tang J., Chen Y., Zhang G. Occurrence and distribution of antibiotics in coastal water of the Bohai Bay, China: impacts of river discharge and aquaculture activities // *Environ. Pollut.* 2011. V. 159. No. 10. P. 2913–2920. doi: 10.1016/j.envpol.2011.04.037

6. Azhogina T.N., Skugoreva S.G., Al-Rammahi A.A.K., Gnennaya N.V., Sazykina M.A., Sazykin I.S. Influence of pollutants on the spread of antibiotic resistance genes in the environment // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 6–14 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-006-014

7. Sazykin I.S., Seliverstova E.Yu., Khmelevtsova L.E., Azhogina T.N., Kudrevskaya E.M., Khamma-

mi M.I., Gnennaya N.V., Al-Rammahi A.A.K., Rakin A.V., Sazykina M.A. Occurrence of antibiotic resistance genes in sewages of Rostov-on-Don and lower Don River // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 4. P. 76–82. doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-076-082

8. Bielen A., Šimatović A., Kosić-Vukšić J., Senta I., Ahel M., Babić S., Jurina T., Plaza J.J., Milaković M., Udiković-Kolić N. Negative environmental impacts of antibiotic-contaminated effluents from pharmaceutical industries // *Water Res.* 2017. V. 126. P. 79–87. doi: 10.1016/j.watres.2017.09.019

9. Ojemaye C.Y., Petrik L. Pharmaceuticals in the marine environment: a review // *Environmental Reviews*. 2019. V. 27. No. 2. P. 51–165. doi: 10.1139/er-2018-0054

10. Yuan Q., Sui M., Qin C., Zhang H., Sun Y., Luo S., Zhao J. Migration, transformation and removal of macrolide antibiotics in the environment: a review // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2022. V. 29. No. 18. P. 26045–26062. doi: 10.1007/s11356-021-18251-22

11. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Yu.V., Odabashyan M.Yu., Nikolaeva K.N. Ecological assessment of the effect of the antibiotic tylosin on the biological properties of common chernozem // *Science. Innovation. Technologies*. 2015. No. 1. P. 186–202 (in Russian).

12. Chesnokova S.M., Savelev O.V. Sessing the antibiotics resistance of various group in environment through // *International Scientific Research Journal*. 2020. No. 9. P. 101–109 (in Russian). doi: 10.23670/IRJ.2020.99.9.018

13. Abramov V.O., Abramova A.V., Cravotto G., Nikonov R.V., Fedulov I.S., Ivanov V.K. Flow-mode water treatment under simultaneous hydrodynamic cavitation and plasma // *Ultrason. Sonochem.* 2021. V. 70. Article No. 105323. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105323

14. Fedoseeva E., Sergeeva Yu., Volkova V., Akulova A., Kamler A., Nikonov R., Sharova A., Terekhova V. The effect of sonoplasma water treatment on the bacterial-fungal complex of microorganisms typical of greenhouses // *Ecology and Industry of Russia*. 2025. V. 29. No. 7. P. 8–12 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2025-7-8-12

15. McCoy L.S., Xie Y., Tor Y. Antibiotics that target protein synthesis // *Wiley Interdiscip. Rev. RNA*. 2011. V. 2. No. 2. P. 209–232. doi: 10.1002/wrna.60

16. Piskarev I.M., Ivanova I.P., Samodelkin A.G., Ivashchenko M.N. Initiation and research of free radical processes in biological experiments: a monograph. N. Novgorod: Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 2016. 140 p. (in Russian).

17. Foster J.E. Plasma-based water purification: challenges and prospects for the future // *Phys. Plasmas*. 2017. V. 24. Article No. 055501. doi: 10.1063/1.4977921

18. Abramov V., Abramova A., Bayazitov V., Kameneva S., Veselova V., Kozlov D., Sozarukova M., Baranchikov A., Fedulov I., Nikonov R., Cravotto G. Fast degradation of tetracycline and ciprofloxacin in municipal water under hydrodynamic cavitation/plasma with CeO₂ nanocatalyst // *Processes*. 2022. V. 10. No. 10. Article No. 2063. doi: 10.3390/pr10102063