



DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-4-556-571

EDN: RYFCYA

УДК 574.24

Научная статья / Research article

Оценка воздействия антибиотиков на ростовые реакции высших растений – потенциальных фиторемедиантов

С.С. Тимофеева^{ID}✉, О.В. Тюкалова^{ID}, С.С. Тимофеев^{ID}*Иркутский национальный исследовательский технический университет,**Иркутск, Российская Федерация*✉ ssstimofeeva@mail.ru

Аннотация. Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования оценки токсичности противомикробных препаратов для объектов окружающей среды. Наиболее простыми и наглядными методами оценки воздействия антибиотиков на окружающую среду являются биоиндикационные методы, в частности оценка фитотоксичности препаратов. Приведены результаты анализа фитотоксического эффекта антибиотиков разной природы по отношению к травянистым растениям различных систематических групп в рамках лабораторного эксперимента. Определен фитотоксический эффект рассматриваемых образцов антибиотиков путем сопоставления показателей тест-функции семян контрольных и опытных групп. Показана зависимость величины фитотоксического эффекта в зависимости от фармацевтической группы антибиотика. Полученные данные являются основой для проведения дальнейших исследований по оценке негативного воздействия на окружающую среду и разработке технологий фиторемедиации объектов окружающей среды. Цель исследования – оценка воздействия антибиотиков на ростовые реакции высших растений – потенциальных фиторемедиантов.

Ключевые слова: антибиотик, фитотоксический эффект, фитотестирование, газоны, фиторемедианты

Благодарности и финансирование. Работа выполнена при поддержке Ученого совета ИРНТУ грант № 18РАН_2020 «Техногенные риски Байкальского региона».

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

© Тимофеева С.С., Тюкалова О.В., Тимофеев С.С., 2023

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


История статьи: поступила в редакцию 12.04.2023; доработана после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 20.08.2023.

Для цитирования: Тимофеева С.С., Тюкалова О.В., Тимофеев С.С. Оценка воздействия антибиотиков на ростовые реакции высших растений – потенциальных фиторемедиантов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 4. С. 556–571. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-4-556-571>

Evaluation of the effect of antibiotics on the growth reactions of higher plants – potential phytoremediants

Svetlana S. Timofeeva  , Olga V. Tyukalova , Semyon S. Timofeev 

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

 sstimofeeva@mail.ru

Abstract. The relevance of the work is due to the need to study the assessment of the toxicity of antimicrobial drugs for environmental objects. The simplest and most obvious methods of assessing the impact of antibiotics on the environment are bioindication methods, in particular, the assessment of phytotoxicity of drugs. The study presents the results of the analysis of the cytotoxic effect of antibiotics of different nature in relation to herbaceous plants of various systematic groups in a laboratory experiment. The phytotoxic effect of the considered antibiotic samples was determined by comparing the indicators of the test function of the seeds of the control and experimental groups. The dependence of the magnitude of the phytotoxic effect on the pharmaceutical group of the antibiotic is shown. The data obtained are the basis for further research to assess the negative impact on the environment and the development of technologies for phytoremediation of environmental objects. The purpose of this work was to evaluate the effect of antibiotics on the growth reactions of higher plants – potential phytoremediants.

Keywords: antibiotic, phytotoxic effect, phytotesting, lawns, phytoremediants

Acknowledgements and Funding. The work was supported by the Academic Council of IRNITU grant No. 18RAN_2020 “Technogenic risks of the Baikal region”.

Authors’ contributions: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Article history: received 12.04.2023; revised 15.05.2023; accepted 20.08.2023.

For citation: Timofeeva SS, Tyukalova OV, Timofeev SS. Evaluation of the effect of antibiotics on the growth reactions of higher plants – potential phytoremediants. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2023;31(4):556–571. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-4-556-571>

Введение

В последнее время все объекты окружающей среды подвергаются возрастающему воздействию поллютантов разной природы. Одним из актуальных вопросов становится загрязнение природной среды антибиотиками [1; 2]

в результате возрастающего их потребления населением, использования в животноводстве для лечения и повышения продуктивности животных и птиц. При этом увеличиваются объем и разнообразие используемых антибиотиков. Особенностью метаболизма антибиотиков в организмах животных и человека является то, что большая часть препарата, введенного в организм, выводится из него в неизменном виде [3]. В результате антибиотики попадают в сточные воды и в отходы агропромышленных животноводческих предприятий и далее в окружающую среду, так как системы очистки этих субстанций не предусматривают удаление медицинских препаратов. Многие антибиотики устойчивы в воде и почве и могут оставаться неизменными в течение длительного времени [4–8]. Известно, что эти вещества могут передаваться по пищевым цепям и накапливаться в организмах животных [9]. Наличие антибиотиков в продуктах питания становится значительной проблемой. Основным следствием неконтролируемого потребления антибиотиков является развитие резистентности – устойчивости бактерий к антибиотикам, что представляется серьезной угрозой здоровью людей, так как с каждым годом становится все труднее подобрать эффективное лечение от инфекционных заболеваний. Особенно важно решение этой проблемы в условиях появления различных пандемий и других угроз биологического характера.

Накопление антибиотиков в окружающей среде, их трансформация и подвижность, а также влияние на экосистемы продолжают изучаться научными коллективами во всем мире [10–17]. В настоящее время выделяются два направления в исследовании антибиотиковой нагрузки на окружающую среду: 1) изучение поведения антибиотиков и их трансформация; 2) влияние антибиотиков на организмы. Следует отметить, что некоторые антибиотики сохраняются долгое время в окружающей среде, особенно в почве. Другие быстро подвергаются распаду, оказывают влияние на рост растений и урожайность сельскохозяйственных культур. Кроме того, появляется много исследований по разработке технологий очистки загрязненных вод, почв от антибиотиков и минимизации рисков для здоровья населения [18–24].

В ИРНТУ в рамках проектного обучения студентов в течение нескольких лет реализуется проект по оценке антибиотиковой нагрузки на объекты окружающей среды в Байкальском регионе и разработке технологий фиторемедиации загрязненных территорий, проектируются устройства для очистки путем высадки на загрязненные поля растений, устойчивых к антибиотикам и способных метаболизировать их. Разрабатываются экспресс-технологии создания газонных покрытий с использованием нетрадиционных фиторемедиантов.

Объекты и методы исследования

Метод фитотестирования широко используется в экологическом мониторинге для оценки токсичности природных и сточных вод, а также биологической активности различных соединений [25].

В данной статье приведены результаты исследования воздействия антибиотиков на ростовые реакции проростков высших растений с целью определения токсического воздействия растворов антибиотиков и выявления их фиторемедиционного потенциала.

В качестве растений тест-объектов исследования использовали проростки горчицы (*Sinapis alba* L.), кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) и овса (*Avena sativa*). В качестве тест-параметров рассмотрены длина побегов и длина корней относительно контроля. Выбранные растения являются классическими образцами для биомониторинга и позволяют получить широкий диапазон оценки потенциального отклика на анализируемые образцы антимикробных препаратов.

Растворы антибиотиков приготавливали на отстоянной водопроводной воде. Состав примесей в используемой воде определяли общепринятыми методами. Установлено, что содержание основных компонентов в воде не превышает ПДК для питьевой воды.

Для проведения эксперимента использовали антибиотики из аптечной сети. В работе применяли растворы тетрациклина, ципрофлоксацина, бициллина-3, амоксициллина, цефтриаксона и левомецетин в концентрациях от 1 до 100 мг/л.

Тетрациклин – противобактериальный антибиотик широкого спектра действия. Является представителем линейных конденсированных полициклических соединений. Тетрациклин нарушает клеточный обмен чувствительных микроорганизмов и подавляет синтез белка.

Ципрофлоксацин – антибиотик широкого спектра действия, относится к группе фторхинолонов – фторсодержащих производных хинолонкарбоновых кислот.

Амоксициллин – относится к группе полусинтетических пенициллинов. Амоксициллин представляет собой аминобензиловый пенициллин, полусинтетический антибиотик широкого спектра действия, обладающий бактерицидным действием в результате ингибирования синтеза бактериальной клеточной стенки.

Бициллин-3 представляет собой антибиотик пенициллиновой группы, способный оказывать продолжительное действие в борьбе с бактериальной флорой различного происхождения.

Цефтриаксон – бактерицидный антибиотик из группы цефалоспоринов. Он угнетает синтез клеточных мембран, применяется в медицине для лечения инфекций центральной нервной системы и желудочно-кишечного тракта. Используется по отношению к пенициллинустойчивым бактериям.

Левомецетин (хлорамфеникол) относится к группе амфениколов, обладает широким антимикробным действием, подавляет развитие грамотрицательных и грамположительных бактерий и многих других возбудителей заболеваний. Влияет на синтез белка в бактериальной клетке [26].

Фитотоксический эффект определяли путем сопоставления показателей тест-функции (длины корней и длины побегов) опытных и контрольных семян. Сначала по формулам (1) определяли величину тест-параметра как среднюю длину корней ($ТП_k$) и среднюю длину побегов ($ТП_{поб}$), мм, измеренных в трех параллельных экспериментах. Аналогично рассчитывали тест-параметры длины корней и побегов для контрольных опытов ($ТП_{контр.к}$ и $ТП_{контр.поб.}$):

$$ТП_k = \frac{\sum ТП_{ik}}{n}; ТП_{поб} = \frac{\sum ТП_{iпоб}}{n}, \quad (1)$$

где $ТП_{ik}$ – максимальная длина корня каждого семени, мм; $ТП_{iпоб}$ – максимальная длина побега каждого семени, мм; n – общее количество семян.

Величина показателя фитотоксического эффекта ($ТЭ$) на выбранные тест-параметры вычислялась по формулам (2) для совокупности длины корней ($ТЭ_k$) и побегов ($ТЭ_{поб}$).

$$ТЭ_k = \frac{ТП_{контр.к} - ТП_k}{ТП_{контр.к}} \cdot 100; ТЭ_{поб} = \frac{ТП_{контр.поб} - ТП_{поб}}{ТП_{контр.поб}} \cdot 100. \quad (2)$$

Рассчитанные показатели фитотоксического эффекта приведены в табл. 1–3.

Фитотестирование проводили в чашках Петри. На фильтровальную бумагу помещали по 20 семян тест-культуры, обрабатывали 15 мл раствора антибиотика соответствующей концентрации и выдерживали при температуре 18–20 °С в течение 7 суток. Контрольные опыты проводился в тех же условиях без добавления антибиотика. Все анализы проводили по три раза.

Статистическая обработка выполнена с использованием надстройки Excel «Пакет анализа данных».

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены данные фитотоксических эффектов антибиотиков на корни и побеги семян горчицы (*Sinapis alba* L.). Из представленных данных следует, что фитотоксические эффекты в значительной мере зависят от концентрации антибиотиков в растворе.

Наиболее токсичными для побегов и корней горчицы являются ципрофлоксацин, тетрациклин и левомицетин в больших концентрациях (более 10 мг/л). Бициллин-3, амоксициллин и цефтриаксон менее токсичны для горчицы. При небольших концентрациях эти антибиотики пенициллинового и цефалоспоринового рядов являются стимуляторами роста побегов (рис. 1).

Для кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) (табл. 2) все антибиотики, кроме тетрациклина и левомицетина в больших концентрациях, являются относительно малотоксичными (длина побегов составляет более 80 % от контроля). Очевидная закономерность токсичного влияния антибиотиков наблюдается для корней кресс-салата. Тетрациклин, ципрофлоксацин и левомицетин

токсичны для роста корней кресс-салата при всех концентрациях, в то время как амоксициллин, бициллин-3 и цефтриаксон малотоксичны (рис. 2).

Таблица 1. Токсический эффект (ТЭ) различных антибиотиков на корни и побеги проросших семян горчицы (*Sinapis alba* L.)

Концентрация антибиотика, мг/л	Тетрациклин	Ципрофлоксацин	Бициллин-3	Амоксициллин	Цефтриаксон	Левомецетин
Токсический эффект на побеги (ТЭ _{поб})						
1	-10,0	-10,0	9,1	9,1	0,0	21,2
5	6,7	3,3	0,0	-10,0	6,1	6,1
10	26,7	16,7	3,0	18,2	18,2	15,2
30	36,7	26,7	-6,1	21,2	15,2	33,3
60	46,7	6,7	0,0	0,0	12,1	66,7
100	56,7	40,0	0,0	15,2	27,3	36,4
Токсический эффект на корни (ТЭ _к)						
1	55,0	52,5	51,0	38,8	8,2	42,9
5	25,0	45,0	34,7	75,5	53,1	46,9
10	82,5	77,5	67,3	59,2	28,6	65,3
30	80,0	70,0	14,3	57,1	57,1	69,4
60	75,0	77,5	53,1	12,2	30,6	79,6
100	92,5	70,0	57,1	32,7	30,6	75,5

Table 1. Toxic effect (TE) of various antibiotics on the roots and shoots of germinated mustard seeds (*Sinapis alba* L.)

Antibiotic concentration, mg/l	Tetracycline	Ciprofloxacin	Bicillin-3	Amoxicillin	Ceftriaxone	Levomecetin
Toxic effect on shoots (TE _{shoot})						
1	-10.0	-10.0	9.1	9.1	0.0	21.2
5	6.7	3.3	0.0	-10.0	6.1	6.1
10	26.7	16.7	3.0	18.2	18.2	15.2
30	36.7	26.7	-6.1	21.2	15.2	33.3
60	46.7	6.7	0.0	0.0	12.1	66.7
100	56.7	40.0	0.0	15.2	27.3	36.4
Toxic effect on roots (TE _{root})						
1	55.0	52.5	51.0	38.8	8.2	42.9
5	25.0	45.0	34.7	75.5	53.1	46.9
10	82.5	77.5	67.3	59.2	28.6	65.3
30	80.0	70.0	14.3	57.1	57.1	69.4
60	75.0	77.5	53.1	12.2	30.6	79.6
100	92.5	70.0	57.1	32.7	30.6	75.5

Влияние антибиотиков на проростки овса посевного (*Avena sativa*) (табл. 3) заключается в том, что длина побегов последовательно снижается по мере увеличения концентрации всех антибиотиков. При этом максимальное снижение длины побегов наблюдается в случае тетрациклина, ципрофлоксацина и левомецетина. Длина корней растения также последовательно уменьшается по мере возрастания концентрации этих антибиотиков. Однако длина корней мало изменяется при увеличении концентрации амоксициллина, бициллина-3 и цефтриаксона и составляет 70–80 % от контрольного (рис. 3).

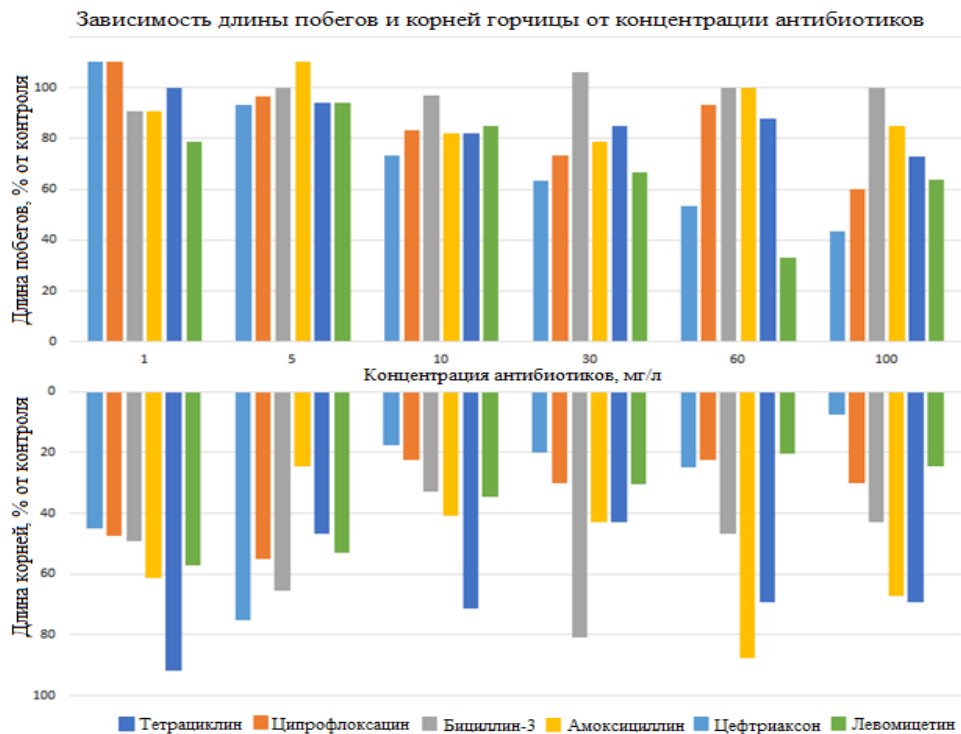


Рис. 1. Динамика ростовых показателей семян горчицы (*Sinapis alba* L.)

Источник: составлено авторами.

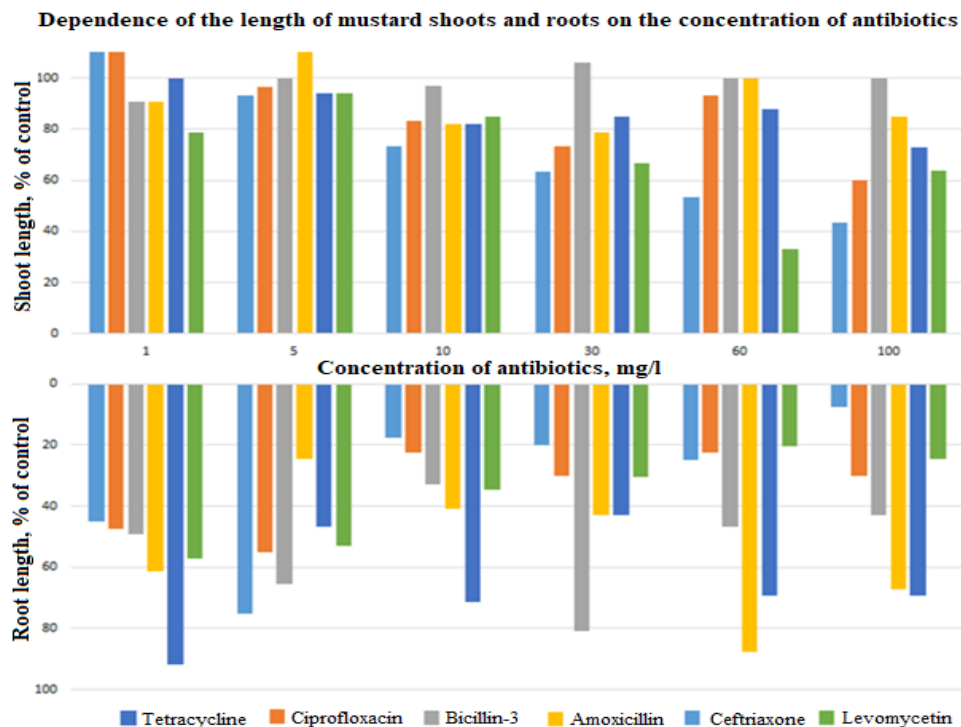


Figure 1. Dynamics of growth indicators of mustard seeds (*Sinapis alba* L.)

Source: compiled by the authors.

Таблица 2. Токсический эффект (ТЭ) различных антибиотиков на корни и побеги проросших семян кресс-салата (*Lepidium sativum* L.)

Концентрация антибиотика, мг/л	Тетрациклин	Ципрофлоксацин	Бициллин-3	Амоксициллин	Цефтриаксон	Левомецетин
Токсический эффект на побеги ТЭ _{поб}						
1	13,6	-2,3	2,5	7,5	10,0	12,5
5	4,5	11,4	-10,0	15,0	2,5	-5,0
10	4,5	2,3	-5,0	7,5	0,0	70,0
30	6,8	0,0	5,0	12,5	10,0	-10,0
60	36,4	2,3	10,0	7,5	15,0	0,0
100	68,2	-2,3	5,0	20,0	7,5	-7,5
Токсический эффект на корни ТЭ _к						
1	50,7	59,7	11,9	-5,9	-4,0	23,8
5	81,3	79,1	3,0	-3,0	8,9	63,4
10	83,6	76,9	2,0	-7,9	-11,9	77,2
30	85,8	76,1	7,0	5,9	4,0	83,2
60	90,3	82,1	39,6	27,7	6,9	84,2
100	94,0	82,1	11,9	-4,0	-2,0	83,2

Table 2. Toxic effect (TE) of various antibiotics on the roots and shoots of sprouted cress seeds (*Lepidium sativum* L.)

Antibiotic concentration, mg/l	Tetracycline	Ciprofloxacin	Bicillin-3	Amoxicillin	Ceftriaxone	Levomecetin
Toxic effect on shoots TE _{shoot}						
1	13.6	-2.3	2.5	7.5	10.0	12.5
5	4.5	11.4	-10.0	15.0	2.5	-5.0
10	4.5	2.3	-5.0	7.5	0.0	70.0
30	6.8	0.0	5.0	12.5	10.0	-10.0
60	36.4	2.3	10.0	7.5	15.0	0.0
100	68.2	-2.3	5.0	20.0	7.5	-7.5
Toxic effect on roots TE _{root}						
1	50.7	59.7	11.9	-5.9	-4.0	23.8
5	81.3	79.1	3.0	-3.0	8.9	63.4
10	83.6	76.9	2.0	-7.9	-11.9	77.2
30	85.8	76.1	7.0	5.9	4.0	83.2
60	90.3	82.1	39.6	27.7	6.9	84.2
100	94.0	82.1	11.9	-4.0	-2.0	83.2

Таким образом, фитотестирование для всех рассмотренных растений показало, что антибиотики β -лактамного (пенициллинового) ряда – бициллин-3 и амоксициллин – являются для растений наименее токсичными из всех рассмотренных препаратов. Относительно невысокую токсичность проявляет цефтриаксон – антибиотик цефалоспориновой группы. Относительно невысокая токсичность цефтриаксона согласуется с данными других авторов [25]. Наиболее токсичными являются тетрациклин, ципрофлоксацин и левомецетин.

Установлено, что для всех изученных растений длина корней является более чувствительным тест-параметром фитотестирования для оценки биологических эффектов антибиотиков.

Зависимость длины побегов и корней кресс-салата от концентрации антибиотиков

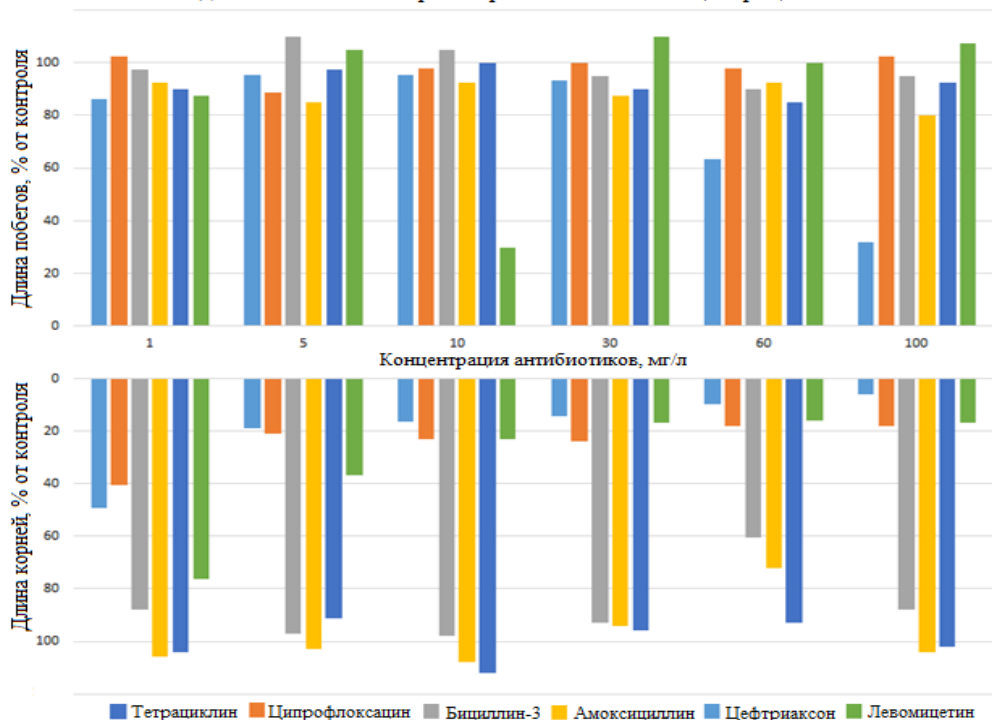


Рис. 2. Динамика ростовых показателей семян кресс-салата (*Lepidium sativum* L.)
Источник: составлено авторами.

Dependence of the length of watercress shoots and roots on the concentration of antibiotics

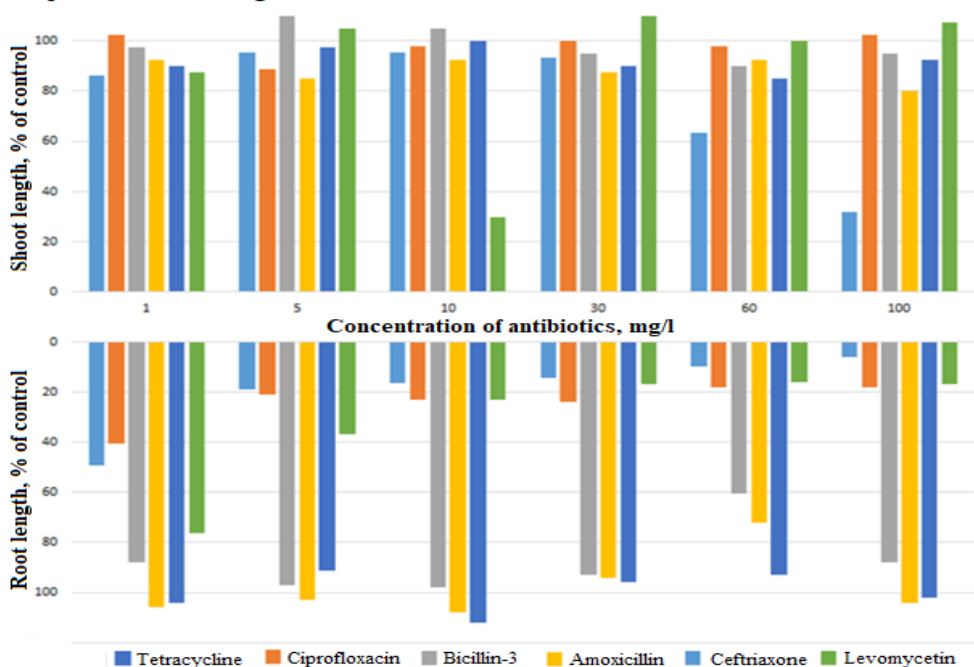


Figure 2. Dynamics of growth indicators of watercress seeds (*Lepidium sativum* L.)
Source: compiled by the authors.

Таблица 3. Токсический эффект (ТЭ) различных антибиотиков на корни и побеги и проросших семян овса посевного (*Avena sativa*)

Концентрация антибиотика, мг/л	Тетрациклин	Ципрофлоксацин	Бициллин-3	Амоксициллин	Цефтриаксон	Левомецетин
Токсический эффект на побеги (ТЭ _{поб})						
1	-2,8	13,0	0,0	10,3	13,1	44,9
5	-4,6	-0,9	0,9	22,4	15,9	10,3
10	7,4	-8,3	13,1	13,1	16,8	11,2
30	30,6	13,0	17,8	21,5	1,9	21,5
60	49,1	27,8	7,5	12,1	5,6	32,7
100	56,5	46,3	21,5	34,6	13,1	34,6
Токсический эффект на корни (ТЭ _к)						
1	9,4	39,1	0,0	16,7	16,7	64,4
5	42,2	39,1	6,7	4,4	3,3	46,7
10	53,1	53,1	18,9	31,1	10,0	58,9
30	75,0	60,9	13,3	18,9	16,7	72,2
60	79,9	64,1	12,2	26,7	13,3	83,3
100	85,9	65,6	40,0	15,6	32,2	87,8

Table 3. Toxic effect (TE) of various antibiotics on the roots and shoots of germinated seeds of oats (*Avena sativa*)

Antibiotic concentration, mg/l	Tetracycline	Ciprofloxacin	Bicillin-3	Amoxicillin	Ceftriaxone	Levomecetin
Toxic effect on shoots (TE _{shoot})						
1	-2.8	13.0	0.0	10.3	13.1	44.9
5	-4.6	-0.9	0.9	22.4	15.9	10.3
10	7.4	-8.3	13.1	13.1	16.8	11.2
30	30.6	13.0	17.8	21.5	1.9	21.5
60	49.1	27.8	7.5	12.1	5.6	32.7
100	56.5	46.3	21.5	34.6	13.1	34.6
Toxic effect on roots (TE _{root})						
1	9.4	39.1	0.0	16.7	16.7	64.4
5	42.2	39.1	6.7	4.4	3.3	46.7
10	53.1	53.1	18.9	31.1	10.0	58.9
30	75.0	60.9	13.3	18.9	16.7	72.2
60	79.9	64.1	12.2	26.7	13.3	83.3
100	85.9	65.6	40.0	15.6	32.2	87.8

Заключение

Таким образом установлено, что в качестве потенциальных фиторемедиантов для создания очистки от антибиотиков пенициллинового ряда и цефалоспориновой группы можно рекомендовать горчицу и овес при создании гидропонных газонных покрытий.

Антибиотики тетрациклинового ряда оказались более токсичными и необходимо продолжить поиск растений, перспективных для технологии биоремедиации.

В качестве субстратов для выращивания гидропонных вариантов ковровой дернины можно использовать вермикулит, древесные опилки, хвою и кору хвойных деревьев, водные растения. Исследования в данном направлении продолжаются, отрабатываются технологии выращивания и укладки газонов.

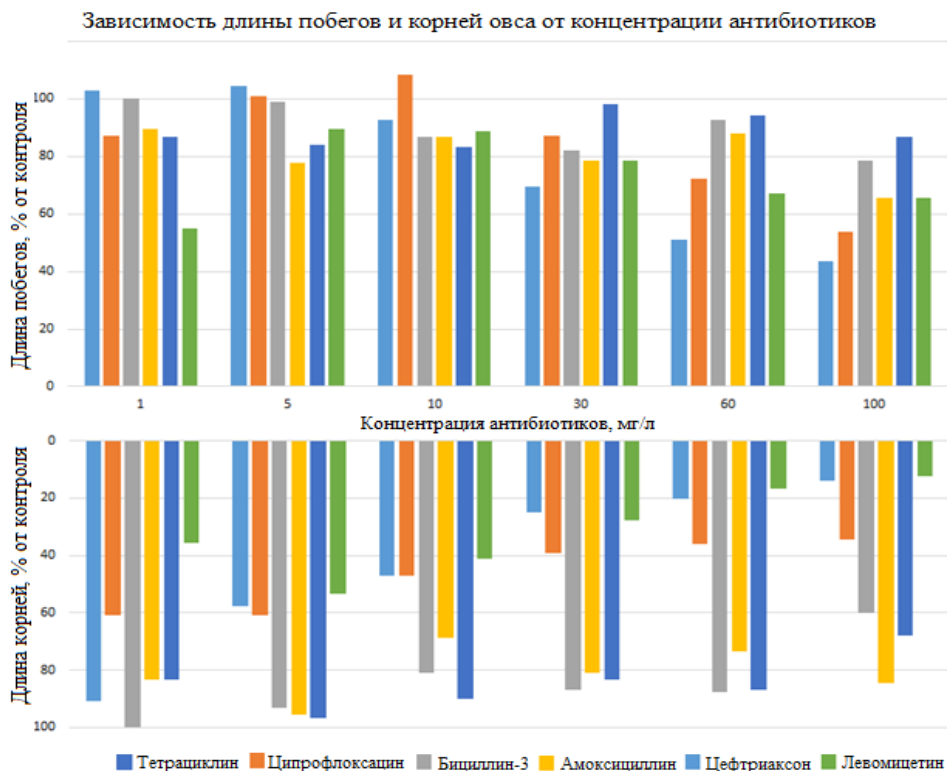


Рис. 3. Динамика ростовых показателей семян овса посевного (*Avena sativa*)
 Источник: составлено авторами.

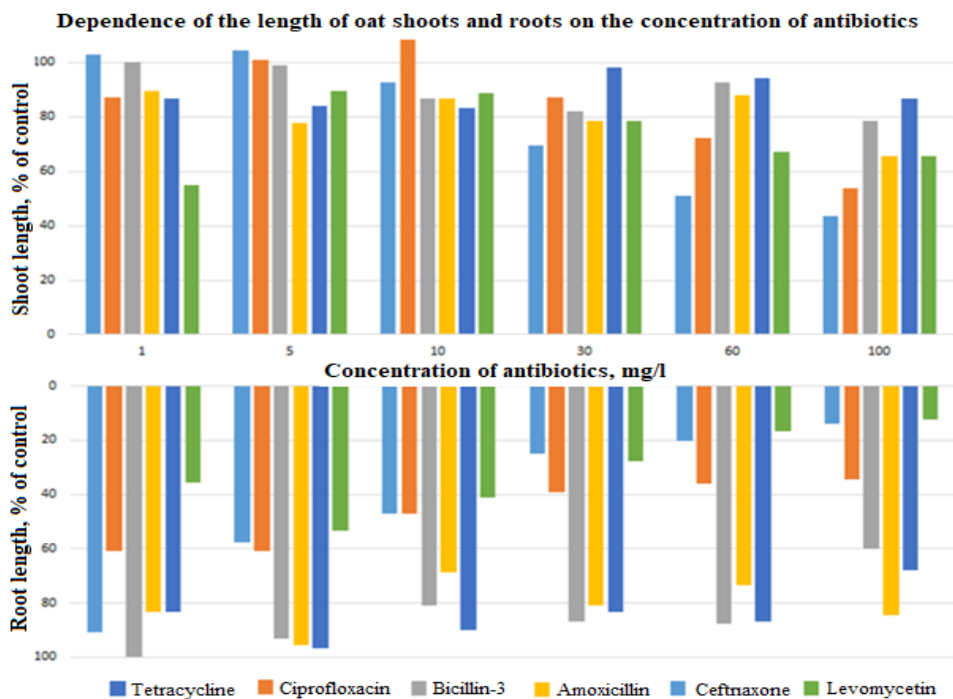


Figure 3. Dynamics of growth indicators of seeds of oats (*Avena sativa*)
 Source: compiled by the authors.

Список литературы

- [1] *Баренбойм Г.М.* Загрязнение природных вод лекарствами. М.: Наука, 2015.
- [2] *Водяницкий Ю.Н., Яковлев А.С.* Загрязнение почв и почвенно-грунтовых вод новыми органическими микрополлютантами // *Почвоведение*. 2016. № 5. С. 609–619.
- [3] *Клиническая фармакология / под ред. В.Г. Кукеса, Д.А. Сычева.* 6-е изд. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021.
- [4] *Kraemer S.A., Ramachandran A., Perron G.G.* Antibiotic pollution in the environment: from microbial ecology to public policy // *Microorganisms*. 2019. № 7. P. 180. <http://doi.org/10.3390/microorganisms7060180>
- [5] *Zheng D., Yin G., Liu M., Chen C., Jiang Y., Hou L., Zheng Y.* A systematic review of antibiotics and antibiotic resistance genes in estuarine and coastal environments // *Science of The Total Environment*. 2021. No. 777 (2). P. 146009. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146009>
- [6] *De Carvalho J.F., Moraes J.E.F.* Treatment of simulated industrial pharmaceutical wastewater containing amoxicillin antibiotic via advanced oxidation processes // *Environmental Technology*. 2021. Vol. 42 (26). P. 4145–4157. <http://doi.org/10.1080/09593330.2020.1745296>
- [7] *Rooklidge S.J.* Environmental antimicrobial contamination from terraccumulation and diffuse pollution pathways // *Science of the Total Environment*. 2004. Vol. 325. P. 1–13. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.11.007>
- [8] *Zhu Y.G., Johnson T.A., Su, J.Q., Qiao M., Guo G.X., Stedtfeld R.D. et al.* Diverse and abundant antibiotic resistance genes in chinese swine farms // *PNAS*. 2013. Vol. 110(9). P. 3435–3440. <http://doi.org/10.1073/pnas.1222743110>
- [9] *Datta R., Das P., Smith S., Punamiya P., Ramanathan D.M., Reddy R., Sarkar D.* Phytoremediation potential of vetiver grass [*Chrysopogon zizanioides* (L.)] for tetracycline // *Int J Phytoremediation*. 2013. Vol. 15(4). P. 343–351. <http://doi.org/10.1080/15226514.2012.702803>
- [10] *Rodriguez-Mozaz S., Chamorro S., Marti E., Huerta B., Gros M., Sánchez-Melsió A. et al.* Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in hospital and urban wastewaters and their impact on the receiving river // *Water Research*. 2015. Vol. 69. P. 234–242. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.021>
- [11] *Danner M.-C., Robertson A., Behrends V., Reiss J.* Antibiotic pollution in surface fresh waters: Occurrence and effects // *Science of The Total Environment*. 10 May 2019. Vol. 664. P. 793–804 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.406>
- [12] *Boxall A., Wilkinson J.* Identifying hotspots of resistance selection from antibiotic exposure in urban environments around the world // *SETAC Europe 29th Annual Meeting, Helsinki, Finland.* May 27, 2019.
- [13] *Zhi C., Zhou J., Yang F., Tian L., Zhang K.* Systematic analysis of occurrence and variation tendency about 58 typical veterinary antibiotics during animal wastewater disposal processes in Tianjin, China // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018. V. 165. P. 376–385. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.101>
- [14] *Zhang Y., Wang B., Cagnetta G., Duan L., Yang J., Deng S., et al.* Typical pharmaceuticals in major WWTPs in Beijing, China: Occurrence, load pattern and calculation reliability // *Water Research*. 2018. Vol. 140. P. 291–300. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.056>
- [15] *Li Z., Zheng T., Li M., Liu X.* Organic contaminants in the effluent of Chinese wastewater treatment plants // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. P. 26852–26860. <http://doi.org/10.1007/s11356-018-2840-2>

- [16] Zhanga M., Liu Y., Zhao J., Liu W., He L., Zhang J. et al. Occurrence, fate and mass loadings of antibiotics in two swine wastewater treatment systems // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 639. P. 1421–1431. <http://doi.org/10.1016/j.amjcard.2008.02.056>
- [17] Williams M., Kookana R.S., Mehta A., Yadav S.K., Taylor B.L., Maheshwari B. Emerging contaminants in a river receiving untreated wastewater from an Indian urban centre // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 647. P. 1256–1265. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.084>
- [18] Шуварин М.В., Борисова Е.Е., Ганин Д.В., Шуварина Н.А., Леханов И.А. Экологические проблемы утилизации отходов животноводства // Вестник НГИЭИ. 2020. № 4 (107). С. 101–112. <http://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10068>
- [19] Гальченко Д.С., Смирнова М.Г., Соколова Л.И. Использование сорбента на основе природного алюмосиликата (вермикулита) для очистки сточных вод от антибиотиков // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6. № 4. С. 387–394. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-387-394>
- [20] Соколова Л.И., Гальченко Д.С., Смирнова М.Г., Блиновская Я.Ю. Использование природных алюмосиликатов для очистки сточных вод от антибиотиков различных классов // Журнал гидрометеорологии и экологии (Труды Российского государственного гидрометеорологического университета). 2021. № 62. С. 113–126. <http://doi.org/10.33933/2074-2762-2021-62-113-126>
- [21] Новикова Ю.А., Маркова О.Л., Фридман К.Б. Основные направления минимизации рисков здоровью населения, обусловленных загрязнением поверхностных источников питьевого водоснабжения лекарственными средствами // Гигиена и санитария. 2018. № 97(12). С. 1166–1170. <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-12-1166-1170>
- [22] Тимофеева С.С., Шуплецова И.Д. Прогнозирование экологических рисков микрополлютантов в Байкальском регионе // XXI век. Техносферная безопасность. 2020. № 5 (3). С. 269–283. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2020-3-269-283>
- [23] Тимофеева С.С., Гудилова О.С. Антибиотики в окружающей среде: состояние и проблемы // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6. № 3. С. 251–265. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-3-251-26>
- [24] Тимофеева С.С., Тимофеев С.С., Тюкалова О.В. Оценка потенциальных рисков для здоровья населения Байкальского региона при употреблении продуктов, загрязненных антибиотиками // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 30. № 3. С. 312–325. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-3-312-325>
- [25] Чеснокова С.М., Савельев О.В. Оценка устойчивости антибиотиков различных групп в водной среде методом биотестирования // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 9–1 (99). С. 101–110. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.99.9.018>
- [26] Егоров Н.С. Основы учения об антибиотиках: учебник. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004. 528 с.

References

- [1] Barenboim GM. *Pollution of natural waters by medicines*. Moscow: Nauka; 2015. (In Russ.)
- [2] Vodyanitskii YuN, Yakovlev AS. Contamination of soils and soil-groundwater with new organic micro pollutants. *Soil Science*. 2016;5:609–619. (In Russ.)

- [3] Kukec VG, Sychev DA (eds.) *Clinical pharmacology*. 6th ed. Moscow: GEHOTAR-Media, 2021. (In Russ.)
- [4] Kraemer SA, Ramachandran A, Perron GG. Antibiotic pollution in the environment: from microbial ecology to public policy. *Microorganisms*. 2019;7:180. <http://doi.org/10.3390/microorganisms7060180>
- [5] Zheng D, Yin G, Liu M, Chen C, Jiang Y, Hou L, et al. A systematic review of antibiotics and antibiotic resistance genes in estuarine and coastal environments. *Science of The Total Environment*. 2021;777(2):146009. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.146009>
- [6] De Carvalho JF, Moraes JEF. Treatment of simulated industrial pharmaceutical wastewater containing amoxicillin antibiotic via advanced oxidation processes. *Environmental Technology*. 2021;42(26):4145–4157. <http://doi.org/10.1080/09593330.2020.1745296>
- [7] Rooklidge SJ. Environmental antimicrobial contamination from terraccumulation and diffuse pollution pathways. *Science of the Total Environment*. 2004;325:1–13. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.11.007>
- [8] Zhu YG, Johnson TA, Su JQ, Qiao M, Guo GX, Stedtfeld, RD, et al. Diverse and abundant antibiotic resistance genes in chinese swine farms. *PNAS*. 2013;110(9):3435–3440. <http://doi.org/10.1073/pnas.1222743110>
- [9] Datta R, Das P, Smith S, Punamiya P, Ramanathan DM, Reddy R, Sarkar D. Phytoremediation potential of vetiver grass [*Chrysopogon zizanioides* (L.)] for tetracycline. *Int J Phytoremediation*. 2013;15(4):343–351. <http://doi.org/10.1080/15226514.2012.702803>
- [10] Rodriguez-Mozaz S, Chamorro S, Marti E, Huerta B, Gros M, Sánchez-Melsió, A, et al. Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in hospital and urban wastewaters and their impact on the receiving river. *Water Research*. 2015;69:234–242. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.021>
- [11] Danner M-C, Anne Robertson A., Volker Behrends V., Reiss J. Antibiotic pollution in surface fresh waters: Occurrence and effects. *Science of The Total Environment*. 2019;664(10):793–804. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.406>
- [12] Boxall A, Wilkinson J. Identifying hotspots of resistance selection from antibiotic exposure in urban environments around the world. *SETAC Europe 29th Annual Meeting*, Helsinki, Finland. May 27, 2019.
- [13] Zhi C, Zhou J, Yang F, Tian L, Zhang K. Systematic analysis of occurrence and variation tendency about 58 typical veterinary antibiotics during animal wastewater disposal processes in Tianjin, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018;165:376–385. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.101>
- [14] Zhang Y, Wang B, Cagnetta G, Duan L, Yang J, Deng S, et al. Typical pharmaceuticals in major WWTPs in Beijing, China: Occurrence, load pattern and calculation reliability. *Water Research*. 2018;140:291–300. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.056>
- [15] Li Z, Zheng T, Li M, Liu X. Organic contaminants in the effluent of Chinese wastewater treatment plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25:26852–26860. <http://doi.org/10.1007/s11356-018-2840-2>
- [16] Zhanga M, Liu Y, Zhao J, Liu W, He L, Zhang J, et al. Occurrence, fate and mass loadings of antibiotics in two swine wastewater treatment systems. *Science of the Total Environment*. 2018;639:1421–1431. <http://doi.org/10.1016/j.amjcard.2008.02.056>
- [17] Williams M, Kookana RS, Mehta A, Yadav SK, Tailor BL, Maheshwari B. Emerging contaminants in a river receiving untreated wastewater from an Indian urban centre. *Science of the Total Environment*. 2019;647:1256–1265. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.084>

- [18] Shuvarin MV, Borisova EE, Ganin DV, Shuvarina NA, Lekhanov IA. Экологические проблемы утилизации отходов животноводства. *Vestnik NGIEI*. 2020;4(107):101–112. <http://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10068>
- [19] Galchenko DS, Smirnova MG, Sokolova LI. Using natural aluminosilicate (vermiculite) sorbent for purifying waste water from antibiotics. *XXI Century. Technosphere Safety*. 2021;6(4):387–394. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-387-394>. (In Russ.)
- [20] Sokolova LI, Gal'chenko DS, Smirnova MG, Blinovskaya YaYu. Using of natural aluminosilicates for clean wastewater from antibiotics various classes. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University)*. 2021;62:113–126. <http://doi.org/10.33933/2074-2762-2021-62-113-126> (In Russ.).
- [21] Novikova YuA, Markova OL, Fridman KB. The main directions of minimizing risks to public health caused by contamination of surface sources of drinking water supply with drugs. *Gigiena i sanitariya*. 2018;97(12):1166–1170. <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-12-1166-1170>. (In Russ.).
- [22] Timofeeva SS, Shupletsova ID. Forecasting environmental risks of micro-pollutants in the Baikal region. *XXI century. Technosphere safety*. 2020;5(3):269–283. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2020-3-269-283> (In Russ.).
- [23] Timofeeva SS, Gudilova OS. Antibiotics in the environment: state and problems. *XXI century. Technosphere safety*. 2021;6(3):251–265. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-3-251-265> (In Russ.).
- [24] Timofeeva SS, Timofeev SS, Tyukalova OV. Assessment of potential risks to the health of the population of the Baikal region when using products contaminated with antibiotics. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2022;30(3):312–325. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-3-312-325>. (In Russ.).
- [25] Chesnokova SM, Savel'ev OV. Assessing the antibiotic resistance of various groups in water environment through biotesting. *International Research Journal*. 2020;9–1(99):101–110. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.99.9.018>. (In Russ.).
- [26] Egorov NS. Fundamentals of learning about antibiotics. 6th ed. Moscow: Izd. MGU. Nauka; 2004. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Тимофеева Светлана Семеновна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Российская Федерация, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83. ORCID: 0000-0001-8427-3732, eLibrary SPIN-код: 8427-9622. E-mail: sstimofeeva@mail.ru

Тюкалова Ольга Васильевна, кандидат химических наук, доцент кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Российская Федерация, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83. ORCID: 0000-0002-2464-261X, eLibrary SPIN-код: 6806-7565. E-mail: olgaburlak1@yandex.ru

Тимофеев Семён Сергеевич, старший преподаватель кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Российская Федерация, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83. ORCID: 0000-0001-7085-9468, eLibrary SPIN-код: 2694-7070. E-mail: sstimofeeva@mail.ru

Bio notes:

Svetlana S. Timofeeva, D. of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial Ecology and Life Safety, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova St, Irkutsk 664074, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-8427-3732, eLibrary SPIN-code: 8427-9622. E-mail: sstimofeeva@mail.ru

Olga V. Tyukalova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Ecology and Life Safety, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova St, Irkutsk 664074, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-2464-261X, eLibrary SPIN-code: 6806-7565. E-mail: olgaburlak1@yandex.ru

Semyon S. Timofeev, Senior Lecturer of the Department of Industrial Ecology and Life Safety, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova St, Irkutsk 664074, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7085-9468; eLibrary SPIN-code: 2694-70. E-mail: sstimofeeva@mail.ru