

С. С. ТИМОФЕЕВА  
О. В. ТЮКАЛОВА  
Д. В. УЛЬРИХ

## ФИТОРЕМЕДИАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ВОДНЫХ РАСТЕНИЙ К ТЕТРАЦИКЛИНУ В УСЛОВИЯХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

PHYTOREMEDIATION POTENTIAL OF AQUATIC PLANTS  
TO TETRACYCLINE IN EASTERN SIBERIA

Рассмотрено современное состояние загрязнения природной среды антибиотиками тетрациклинового ряда. Показано, что крупномасштабное, а зачастую и несанкционированное использование тетрациклинов в ветеринарной практике приводит к их накоплению в продуктах питания животного происхождения и объектах окружающей среды, к эндокринным нарушениям, хронической токсичности и развитию антибиотикоустойчивости. Имеющиеся очистные сооружения, как правило, не обеспечивают удаление антибиотиков из сточных вод, они транзитом проходят через систему очистки и поступают непосредственно в водные объекты (реки, озера) и создают угрозу водопользователям, расположенным ниже по течению реки. Препятствием на пути распространения антибиотиков могут стать системы доочистки в виде фито-инженерных очистных сооружений с посадками водных растений, обладающих высоким фиторемедиационным потенциалом к антибиотикам. Установлено, что водные растения способны элиминировать тетрациклин из водной среды. Предложено рассматривать фиторемедиацию как одно из недорогих решений удаления антибиотиков из водной среды.

**Ключевые слова:** антибиотики, тетрациклин, фиторемедиация, водные растения, очистка сточных вод

The current status of the environment pollution with tetracycline antibiotics is considered. It is demonstrated that big-scale and often unauthorized use of tetracyclines in veterinary practice leads to their accumulation in foods of animal origin and in natural environments, resulting in endocrine disorders, chronic toxicity, and development of antibiotic resistance. The existing treatment facilities as a rule do not ensure the removal of antibiotics from wastewater, so these transit through the treatment system, directly enter water bodies (rivers, lakes), and pose a threat for water users located downstream. To block this path of antibiotics spread, advanced treatment systems can be used, such as phyto-engineering treatment facilities with growing of aquatic plants with high phytoremediation potential for antibiotics. It has been found that aquatic plants are capable of eliminating tetracycline from water medium. It has been proposed to consider phytoremediation as one of reasonably-priced solutions for removing antibiotics from water medium.

**Keywords:** antibiotics, tetracycline, phytoremediation, aquatic plants, wastewater treatment

### Введение

В условиях пандемии Covid 19 практически неконтролируемое на законодательном уровне использование антибиотиков в медицине в процессах самолечения населения, а также в сельском хозяйстве с целью повышения продуктивности животных и птиц в животноводстве, птицеводстве, аквакультуре создало серьезные экологические проблемы фармацевтического мусора и его нового аспекта – антибиотикоустойчивости патогенных микроорганизмов. По данным многочисленных исследований установлено, что практически все объекты окружающей среды: поверхностные воды, почвы,

пищевые продукты растительного и животного происхождения в той или иной степени загрязнены антибиотиками [1–13].

В настоящее время в ветеринарии и медицинской практике наиболее распространенными и часто применяемыми являются тетрациклины, пенициллины и аминогликозиды [14–16].

Эти антибиотики чаще других используются в качестве кормовых добавок и способствуют быстрому росту животных и птиц и получению товарной продукции, а следовательно, их применение экономически выгодно для сельхозпроизводителей продукции животного происхождения. Тетрациклины широко применяются не только на крупных фермах и пти-

цефабриках, но и домашних подворьях. Среди ветеринарных антибиотиков именно производство и потребление тетрациклинов занимает ведущее положение. Окситетрациклин и хлортетрациклин получили большое распространение в качестве стимуляторов роста [17], а окситетрациклин – в пчеловодстве и аквакультуре.

Передозировка данных препаратов обуславливает их накопление в продуктах питания, и необходим жесткий контроль остаточного содержания антибиотиков в товарной продукции. В настоящее время установлены нормативы Евросоюза, регламентирующие остаточное содержание в продуктах, а именно максимально допустимые уровни содержания тетрациклина, окситетрациклина и хлортетрациклина в молоке, мясе, субпродуктах и яйцах. Допустимые концентрации варьируются в диапазоне от 0,1 до 0,6 мг/кг для разных продуктов [18].

Остаточное содержание тетрациклина и его производных в молоке, мясе, птице, яйцах и мёде согласно российским нормативам должно быть менее 0,01 мг/кг (сумма исходных веществ и их 4-эпимеров) [19]. ПДК для доксициклина в мясе и субпродуктах варьируются от 0,1 до 0,6 мг/кг [20].

Законодательно нерегламентированное потребление тетрациклинов приводит к серьезным проблемам со здоровьем потребителей загрязненных продуктов питания, а именно к эндокринным нарушениям, хронической интоксикации и развитию устойчивых к антибиотикам микроорганизмов, создает сложности лечения инфекционных заболеваний у людей, экономическим потерям и требует создания новых поколений антибиотиков.

Для всех тетрациклинов характерен широкий спектр антимикробного действия. Они высокоактивны в отношении большинства грамположительных и грамотрицательных бактерий. Механизм антибактериального действия тетрациклинов связан с подавлением белкового синтеза (блокада функции рибосом). Штаммы, устойчивые к тетрациклинам, чаще обнаруживаются среди стафилококков и возбудителей желудочно-кишечных инфекций (эшерихий и сальмонелл). Большинство грамположительных микроорганизмов чувствительны к тетрациклинам в концентрации 1 мкг/мл и менее, большинство грамотрицательных – в концентрации 1–25 мкг/мл.

Общее потребление тетрациклина в Европе, в том числе в России, за 2016–2018 гг. составило четверть от всех использованных антибиотиков [21]. Потребление антибиотиков в России в 2015 г. по данным ВОЗ находилось на среднем уровне и составило 14,82 определенных суточных доз на 1000 человек. Исходя из этой оценки в течение года в стране было использовано 915,65 т противомикробных препаратов [22].

Плохо контролируемое употребление тетрациклинов приводит к их накоплению в объектах окружающей среды и созданию проблем фармацевтического мусора. В частности показано, что хлортетрациклин, накапливающийся в почве, оказывает токсичное действие на репродуктивные функции дождевых червей *Eisenia fetida*, его биохимические реакции – активности каталазы, супероксиддисмутазы и глутатион-S-трансферазы [23]. Этот антибиотик оказывает токсичное действие на рост кукурузы и образование активных форм кислорода [24], особенно опасен на ранних стадиях развития растений. Окситетрациклин влияет на ферментативную активность почвенных микроорганизмов при концентрациях более 15 мг/кг [25]. При исследовании воздействия окситетрациклина на пшеницу установлено, что он может ингибировать удлинение побегов и корней,  $EC_{50} = 65,5$  мг/л и 34,7 мг/л соответственно [26].

Появились научные публикации, где исследовалась способность не только микроорганизмов, но и растений поглощать и подвергать окислительной деградации тетрациклины и осуществлять процесс фиторемедиации. В частности доказаны фиторемедиационные свойства цветковых растений *Mirabilis jalapa* и *Tagetes patula* L кумулировать кадмий и тетрациклины из загрязненных почв. Эффективность удаления тетрациклина всех обработок была выше 99 %, эти цветочные растения, по мнению авторов, являются перспективными гипераккумуляторами, которые могут быть использованы для восстановления щелочной почвы, совместно загрязненной Cd и тетрациклином [27]. Изучена способность растения *Cicer arietinum* (черный горох) снижать концентрацию тетрациклина в почве в 2,5 раза в течение 21 дня, авторы утверждают, что это растение перспективно для создания технологии фиторемедиации загрязненных почв, так как токсичный эффект не фиксировался при концентрациях тетрациклина до 0,225 мг/мл [28].

Опробована технология извлечения тетрациклина травой ветивера. Установлено, что в зависимости от начальных концентраций и времени при выращивании травы в течение 60 сут в загрязненной гидропонной установке, полное удаление тетрациклина происходит по прошествии 40 сут при всех испытанных концентрациях. При этом тетрациклин накапливается в корнях, а затем перемещается в ткани побегов [29].

Водные растения *Myriophyllum aquaticum* (перо попугая) и *Pistia stratiotes* (водяной салат) использовались для изучения фиторемедиации тетрациклина и окситетрациклина из водных сред. Установлено, что происходит модификация тетрациклина в водной среде,

так как отмечается изменение спектральных характеристик растворов. Кинетический анализ исключает прямой ферментативный катализ; скорость модификации снижалась с увеличением безрецептурных концентраций [30].

При оценке потенциала тростника обыкновенного (*Phragmites australis*) удалять ветеринарные препараты (энрофлоксацин, цефтиофул, тетрациклин) их водных сред установлено, что эффективность очистки колеблется в диапазоне 75–94 %. При этом в процессе удаления не участвуют микроорганизмы. Основную функцию выполняют корни растений. Предложено осуществлять посадки *P. australis* для удаления фармацевтических препаратов из сточных вод животноводческой фермы и скотобойни [31].

Технологии фиторемедиации загрязненных вод с использованием очистительных функций водных растений исследуется учеными разных географических широт с учетом их особенностей. В настоящее время во многих странах широкое применение находят специально построенные водно-болотные угодья в качестве дополнительного этапа очистки после очистных сооружений [32].

На Тайване на построенных водно-болотных угодьях Вудуо детально исследованы процессы очистки от 13 ветеринарных антибиотиков, в том числе тетрациклинов, сульфанимидов, хлорамфениколов, фторхинолонов и красителей в концентрациях до 552 нг/л. Эффективность удаления антибиотиков варьировали в диапазоне от 43 до 87 % в зависимости от его химической структуры. Остаточное содержание тетрациклина, хлортетрациклина, сульфамеразина, сульфаметазина и красителей: малахитовый зеленый и лейкомахитовый зеленый после очистки было ниже пределов обнаружения во всех образцах [33].

Из-за недостаточного внимания проблемам фармацевтического мусора в регионах с резко континентальным климатом, свойственным Восточной Сибири, неосведомленности общественности и постоянного неконтролируемого их поступления в окружающую среду в Байкальском регионе возникла серьезная экологическая проблема загрязнения объектов среды обитания антибиотиками. Имеющиеся очистные сооружения, как правило, не обеспечивают удаление антибиотиков из сточных вод, и они транзитом проходят через систему очистки и поступают непосредственно в водные объекты (реки, озера) и создают угрозу водопользователям, расположенным ниже по течению реки. Препятствием на пути распространения антибиотиков могут стать системы доочистки в виде фито-инженерных очистных сооружений с посадками водных растений, обладающих высо-

ким фиторемедиационным потенциалом к антибиотикам [34–36].

Целью настоящей работы являлась оценка фиторемедиационного потенциала водных растений, произрастающих в условиях Восточной Сибири, к антибиотикам на примере тетрациклинов.

### Объекты и методы исследования

В работе использовали тетрациклин, полученный из аптечной сети. Антибиотики тетрациклиновой группы представляют собой полифункциональные гидронафтаценовые соединения, состоящие из четырех циклических структур:

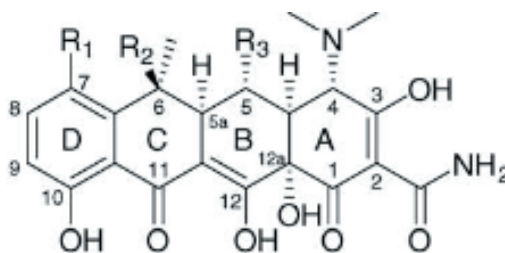


Рис. 1. Циклические структуры антибиотиков:

Тетрациклин: R1=R3=H, R2=OH;

Окситетрациклин: R1=H, R2=R3=OH

Хлортетрациклин: R1=Cl, R2=OH, R3=H;

Доксициклин: R1=R2=H, R3=OH

Фиторемедиационный потенциал водных растений оценивали в условиях лабораторного моделирования.

На первом этапе исследования выполнили фитотестирование тетрациклина по ростовым реакциям водного растения – элодея канадская, рекомендованного в качестве тест-объекта в водной токсикологии. Тестирование проводили по следующей схеме: растения отбирали в р. Ангаре, выбирали верхушечную часть побегов длиной 5 см, помещали по 10 штук в колбы с 500 мл исследуемого раствора тетрациклина заданной концентрации и выдерживали в лаборатории определенное время при комнатной температуре. Через 3–7 сут измеряли длину побегов и оценивали прирост в процентах к контролю.

Исследования по оценке фиторемедиационного потенциала водных растений, произрастающих в Ангаре, проводили по следующей схеме. Растения собирали тралом, освобождали от грунта, промывали и культивировали в лаборатории в аквариумах с деchlorированной водой при умеренном освещении и температуре 14–16 °С. Объектами исследований были: элодея канадская (*Elodea canadensis*), уруть мутовчатая (*Myriophyllum spicatum*), роголистник темно-зеленый (*Ceratophyllum demersum*).

В колбы вместимостью 500 мл помещали навески водных растений из расчета 1–10 г/л, заполняли водой с заданными концентрациями тетрациклина и выдерживали в термостате при освещенности 2–2,5 тыс. лк при температуре от 18 до 20 °С. Через определенные промежутки времени отбирали пробы и анализировали остаточное содержание тетрациклина. Во всех исследованиях параллельно ставили контрольные эксперименты: растворы тетрациклина без растений, с растениями, предварительно термообработанными или стерилизованными 0,1 %-м раствором сулемы (с последующей промывкой дистиллированной водой).

Для контроля концентрации тетрациклина в испытуемых растворах использовали спектрофотометр Shimadzu 1800. Тетрациклин в нейтральной среде имеет УФ-полосу поглощения с максимумом в области 360 нм (1 на рис. 2, а), обусловленную электронной структурой молекулы, образованной из четырех конденсированных ароматических колец и заместителей при них. В сильнощелочной среде происходит изомеризация тетрациклина с образованием окрашенных в желтый цвет изомеров с максимумом УФ поглощения при 380 нм (2 на рис. 2, а). Эта реакция используется для идентификации и спектрофотометрического количественного определения тетрациклина.

Через 1, 2, 3, 6, 9 и 18 сут отбирали пробы, фильтровали через фильтр «синяя лента», доводили pH раствора до щелочной среды (pH=9.0) и оценивали остаточную концентрацию тетрациклина по УФ поглощению при 380 нм по градуировочному графику (рис. 2, б).

Физиологическое состояние водных растений оценивали по движению протоплазмы, хлоропластов, внешнему виду растений и содержанию хлорофилла и активности ферментов из класса оксидоредуктаз.

## Результаты и их обсуждение

При оценке воздействия на ростовые реакции водного растения *Elodea Canadensis* установлено, что в области исследованных концентраций от 5 до 30 мг/л наблюдается стимулирование роста побегов элодеи по сравнению с контролем в условиях хронического эксперимента (рис. 3). Только при концентрациях 60 мг/л и более отмечается ингибиторный эффект, следовательно, водные растения способны элиминировать тетрациклин.

Экспериментально установлено, что в присутствии исследуемых водных растений происходит более интенсивное снижение содержания тетрациклина в растворе по сравнению с контролем. Как видно из данных, приведенных на рис. 4–6, все исследованные водные растения эффективно удаляют (элиминируют) тетрациклин из раствора. Через 13–18 сут водные растения удаляют до 65–80 % антибиотика от исходного. В контрольных опытах без растений или в опытах с растениями, предварительно инактивированными кипячением, наблюдается значительно менее интенсивное снижение содержания тетрациклина (на 40–50 % от исходного уровня).

Процесс элиминирования тетрациклина описывается уравнением первого порядка, константы скорости этого процесса приведены в табл. 1. В настоящем исследовании под элиминированием понимается вся совокупность процессов, приводящих к уменьшению содержания тетрациклина во внешнем растворе и включающих как поглощение растениями, так и метаболизм под действием ферментных систем растений.

Из всех исследованных растений наибольшая скорость элиминирования характерна для урути мутовчатой при всех исходных концентрациях тетрациклина.

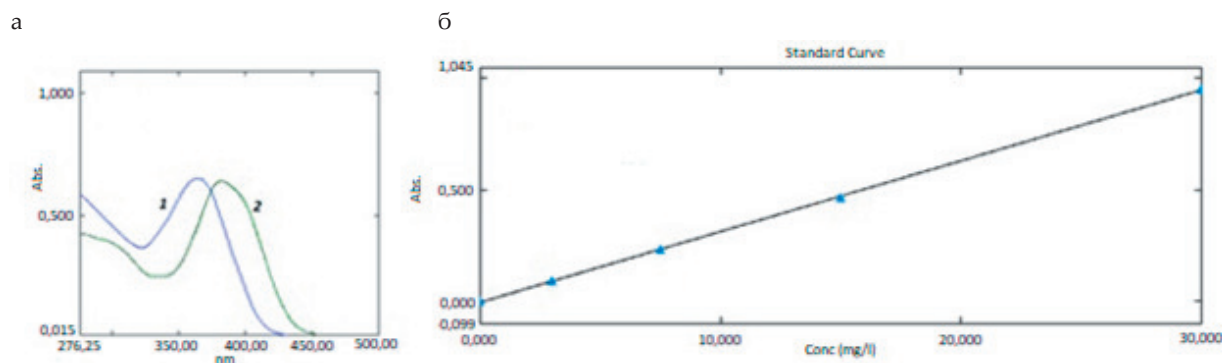


Рис. 2. Контроль концентрации тетрациклина в испытуемых растворах:  
а – полосы УФ поглощения тетрациклина;  
б – градуировочный график для количественного определения тетрациклина



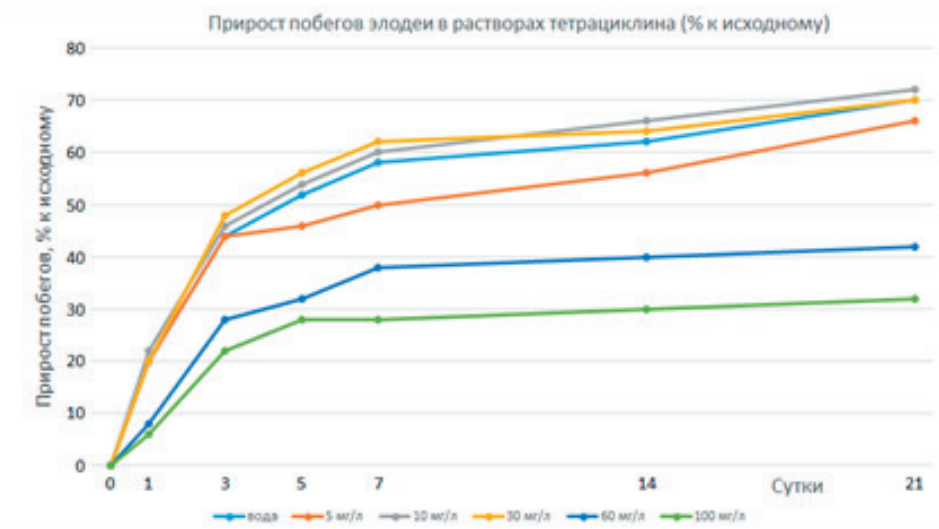


Рис. 3. Прирост побегов элодеи канадской в растворах тетрациклина

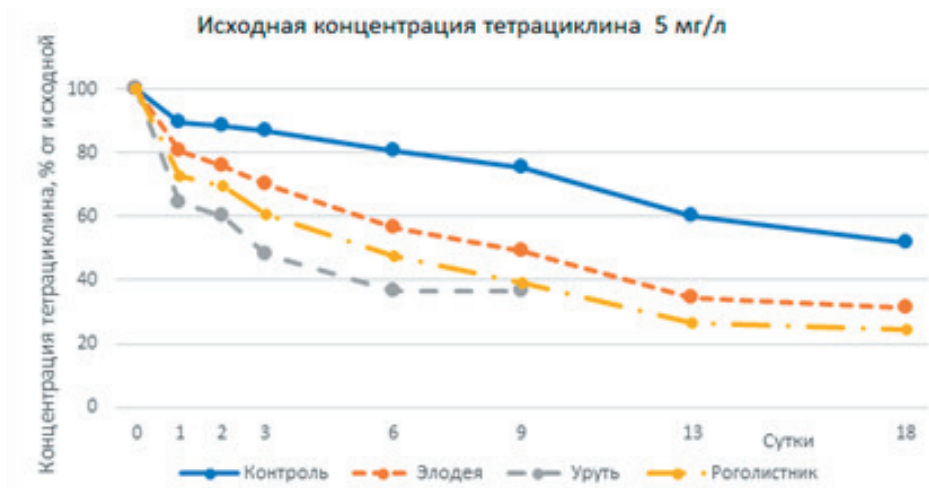


Рис. 4. Изменение концентрации тетрациклина в водных растворах в присутствии водных растений при исходной концентрации тетрациклина 5 мг/л

Таблица 1

Константы скорости элиминирования тетрациклина (К, сут-1) водными растениями для разных исходных концентраций (фитомасса растений 10 г/л; температура 18±2 °С; рН = 6,8)

Условия опыта	Исходная концентрация тетрациклина, мг/л		
	5	10	30
В природной воде без растений	0,110±0,046	0,059±0,024	0,041±0,023
В природной воде с растениями, инактивированными кипячением	0,098±0,052	0,052±0,027	0,040±0,026
С элодеей канадской	0,218±0,038	0,088±0,025	0,235±0,046
С роголистником темно-зеленым	0,320±0,064	0,061±0,031	0,242±0,061
С урутью мутовчатой	0,440±0,094	0,207±0,077	0,442±0,106

Установлено также, что с увеличением фитомассы растений при исходной концентрации 10 мг/л начальные скорости элиминирования возрастают. Эта зависимость описывается линейным уравнением  $Y = 0,142 X + 0,356$  с коэффициентом корреляции  $R=0,99$ .

Биохимическая природа элиминации в случае элодеи канадской подтверждается линейной зависимостью начальных скоростей элиминирования в экспериментах с гомогенатами элодеи и ферментными препаратами, полученными при промывке ацетоном, в частности пероксидазой. Ранее совместно с учеными из Грузии нами были впервые выделены и изучены свойства пероксидазы из элодеи канадской [37].

При изучении методом гель-фильтрации было установлено, что в элодее имеются пероксидазы с молекулярными массами 94000, 67000, 56000 и 48900. Оптимум pH низкомолекулярной фракции пероксидазы 5,6–6,2, а высокомолекулярной – pH 4,1–5,0. Следовательно, в процессе элиминирования тетрациклина возможно участие пероксидаз в широком диапазоне pH.

На основании экспериментальных данных был рассчитан фиторемедиационный потенциал водных растений по тетрациклину для разных исходных концентраций антибиотика (табл. 2).

Согласно полученным результатам, для всех исходных концентраций антибиотика в первые 6 сут максимальную поглощающую

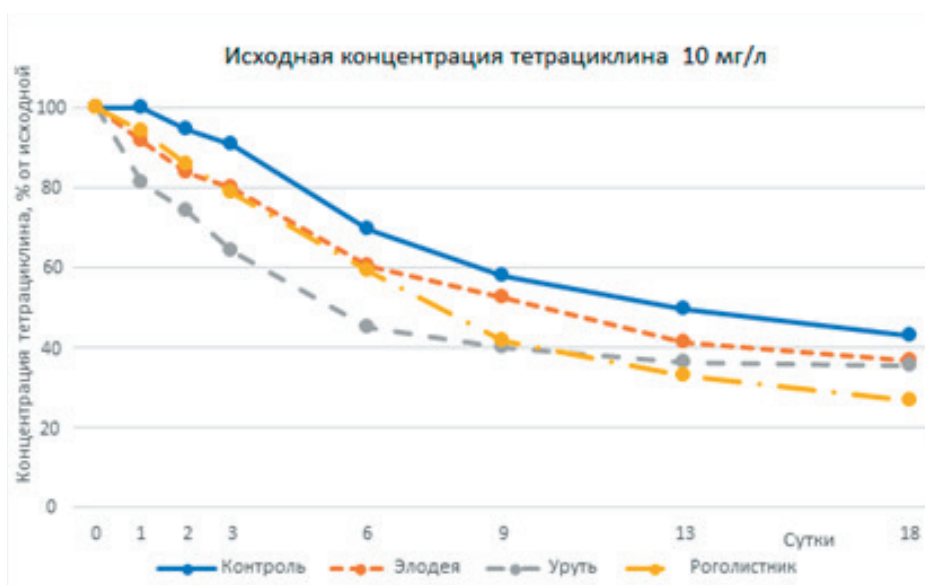


Рис. 5. Изменение концентрации тетрациклина в водных растворах в присутствии водных растений при исходной концентрации тетрациклина 10 мг/л

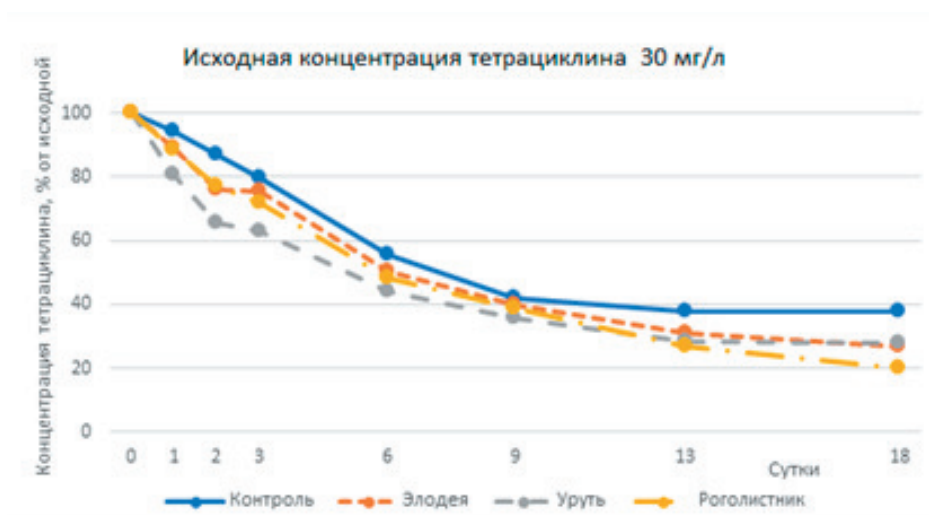


Рис. 6. Изменение концентрации тетрациклина в водных растворах в присутствии водных растений при исходной концентрации тетрациклина 30 мг/л

Таблица 2

Фиторемедиационный потенциал водных растений к тетрациклину, мг/г сырого веса

Время экспозиции, сут	Исходная концентрация тетрациклина, мг/л								
	5			10			30		
	Элодея	Уруть	Роголистник	Элодея	Уруть	Роголистник	Элодея	Уруть	Роголистник
1	0,10	0,18	0,14	0,08	0,19	0,06	0,32	0,57	0,34
3	0,15	0,26	0,20	0,20	0,36	0,21	0,74	1,12	0,84
6	0,22	0,32	0,26	0,40	0,55	0,31	1,49	1,68	1,54
18	0,34	0,32	0,38	0,63	0,64	0,73	2,19	2,16	2,39

активность проявляет уруть мутовчатая, а через 18 сут возрастает фиторемедиационный потенциал роголистника.

Заключение

Сравнив результаты собственных исследований с литературными данными [38] по извлечению противовоспалительных препаратов растениями *Scirpus validus* и *Typha angustifolia*, можно сделать вывод, что эффективность извлечения тетрациклина элодеей канадской, урутью мутовчатой и роголистником темно-зеленым соизмерима с этими растениями и достигает 11–85 %. Максимальная скорость элиминирования тетрациклина из воды установлена для урути мутовчатой. Рассмотренные растения демонстрируют адаптивные свойства в условиях тетрациклинового загрязнения. Очевидно, в них формируются реакции, направленные на усвоение или обезвреживание антибиотика. Полученные результаты позволяют рассматривать фиторемедиацию погруженными водными растениями как одно из недорогих решений удаления антибиотиков из водной среды. Необходимо продолжить исследования по созданию гибких фитоинженерных систем для очистки объектов окружающей среды от ветеринарных антибиотиков. В условиях Восточной Сибири работа фиторемедиационных сооружений может обеспечиваться в полном объеме только при положительных температурах. Предполагаемая длительность работы сооружений в году приравнивается к длительности формирования поверхностных стоков и составляет примерно 58 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терехова В.А., Руднева И.И., Поромов А.А., Парамонова А.И., Кыдралиева К.А. Распространение и биологические эффекты антибиотиков в водных экосистемах (обзор) // Вода: химия и экология. 2019. № 3–6(119). С. 92–112.

2. Тимофеева С.С., Шуплецова И.Д. Прогнозирование экологических рисков микро-поллютантов в Байкальском регионе // XXI век. Техносферная безопасность. 2020. №5(3). С. 269–283 [Электронный ресурс] <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2020-3-269-283> (дата обращения: 05.04.2022).

3. Батаева Д.С., Зайко Е.В. Риски, связанные с наличием в мясе и в продуктах убоя животных остаточных количеств антимикробных препаратов // Теория и практика переработки мяса. 2016. №1(3). С. 4–13.

4. Зайко Е.В., Батаева Д.С. Идентификация рисков, связанных с сырьем животного происхождения // Теория и практика переработки мяса. 2018. № 3(4). С. 23–31. DOI 10.21323/2414-438X-2018-3-4-23-31.

5. Прожерина Ю. Фармацевтические отходы как новая экологическая проблема // Ремедиум. 2017. № 11. С. 14–19.

6. Иванова Н.В., Белов А.И., Самаркин А.И. Биоэкологические последствия загрязнения окружающей среды и пути их уменьшения // Военная медицина. 2020. №1. С. 79–89 [Электронный ресурс] <http://rep.bsmu.by:8080/handle/BSMU/26453> (дата обращения: 05.04.2022).

7. Wang H., Ren L., Yu X., Chen Y, He G., Jiang Q. Antibiotic residues in meat, milk and aquatic products in Shanghai and human exposure assessment. Food control. 2017. 80. P. 217–255.

8. Fang B., J. Guo F. Li J.P. Giesy, L. Wang, and W. Shi. Bioassay directed identification of toxicants in

sludge and related reused materials from industrial wastewater treatment plants in the Yangtze River Delta. *Chemosphere*. 2017. 168. P. 191–198.

9. Fang J., Shen Y., Qu D., Han J. Antimicrobial resistance profiles and characteristics of integrons in *Escherichia coli* strains isolated from a large-scale centralized swine slaughterhouse and its downstream markets in Zhejiang China. *Food control*. 2019. 95. P. 215–222.

10. Monitoring global progress on antimicrobial resistance. 2018 [Electronic resource]: <http://www.fao.org/publications/card/en/c/CA0486EN/>. Date of access: 05.04.2022.

11. Antoine Gosset, Philippe Polomé, Yves Perrodin. Ecotoxicological risk assessment of micropollutants from treated urban wastewater effluents for watercourses at a territorial scale: Application and comparison of two approaches. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2020 – 224-113437. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.113437> date of access 05.04.2022.

12. Muhammad Arslan, Inaam Ullah, Jochen A. Müller, Naem Shahid, Muhammad Afzal. Organic Micropollutants in the Environment: Ecotoxicity Potential and Methods for Remediation In book: Enhancing Cleanup of Environmental Pollutants – Biological Approaches Edition: 1 Chapter: Chapter 5 Publisher: Springer International Publishing Editors: Naser Anjum, Saravjeet Gill, Narendra Tuteja Projects: Effect of Selected Organic Micro-Pollutants (OMPs) on Plant Ecology Organic Micropollutants (OMPs) in the Environment: Phytotoxic Potential and Risks for Plant Microflora May 2017 DOI: 10.1007/978-3-319-55426-6.

13. Hui Gao, Linxiao Zhang, Zihao Lu, Chunming He, Qianwei Li, Guangshui Na Complex migration of antibiotic resistance in natural aquatic environments. *Environmental Pollution*. 2018. 232. P. 1-9.

14. Sarmah AK, Meyer MT, Boxall AB. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (Vas) in the environment. *Chemosphere*. 2006. 65. P.725-759

15. Ding C., and He J. Effect of antibiotics in the environment on microbial populations. *Appl. Microbiol. Biot*. 2010. 87. P. 925-941.

16. Kummerer, K (2009) Antibiotics in the aquatic environment-A review-Part I. *Chemosphere*. 2009. 75. P. 417-434.

17. Chopra I., Roberts M. Tetracycline Antibiotics: Mode of Action, Applications, Molecular Biology, and Epidemiology of Bacterial Resistance. *Mol. Biol. Rev*. 2001. V. 65. №. 2. P. 232-260.

18. Barroso J.M. Commission regulation (EU) № 37/2010 of 22 December 2009 on pharmacologically active substances and their classification regarding maximum residue limits in foodstuffs of animal origin. *Off. J. Eur. Union*. 2010. V. 1. № 15. P. 1–72.

19. Совет ЕЭК. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011. 2019. С. 263.

20. Коллегия ЕЭК. Решение коллегии ЕЭК от 13 февраля 2018 года № 28 «О максимально допустимых уровнях остатков ветеринарных лекарственных средств (фармакологически активных веществ), которые могут содержаться в переработанной пищевой продукции животного происхождения, в том числе в сырье, и методиках их определения». 2018. 66 с.

21. World Health Organization et al. WHO report on surveillance of antibiotic consumption: 2016-2018 early implementation. 2018. Available at: <https://www.aidshub.org/sites/default/files/resource/who-report-surveillance>, date of access 05.04.2022

22. ВОЗ опубликовала рейтинг потребления антибиотиков в мире/ [Электронный ресурс] <https://www.med-practic.com/rus/812/51005/ВОЗ%20опубликовала%20рейтинг%20потребления%20антибиотиков%20в%20мире/article.more.html> (дата обращения: 05.04.2022).

23. Angel J Baguer, John Jensen, Paul Henning Krogh. Effects of the antibiotics oxytetracycline and tylosin on soil fauna//*Chemosphere*. 2000. 40. 7. P. 751-757. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00449-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00449-X) (date of access 05.04.2022).

24. Wen B, Liu Y, Wang P, Wu T, Zhang S, Shan X, Lu J. Toxic effects of chlortetracycline on maize growth, reactive oxygen species generation and the antioxidant response. *J Environ Sci (China)*. 2012. 24(6). P.1099-1105. doi: 10.1016/s1001-0742(11)60901-7. PMID: 23505878

25. An, J., Zhou, Q.X. and Liu, W.T. Ecotoxicological Effects of Oxytetracycline on Wheat (*Triticum aestivum*) Based on Seed Germination and Seedling Development. *Environmental Science*. 2009. 30. P. 3022-3027.

26. Chen W., Liu W., Pan N., Jiao W. and Wang M. Oxytetracycline on Functions and Structure of Soil Microbial Community. *Journal of Soil Science and Plant Nutritio*. 2013. 13. P. 967-975. Available at: <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-95162013005000076>, date of access 05.04.2022.

27. Li, X., Zhu, W., Meng, G. et al. Phytoremediation of alkaline soils co-contaminated with cadmium and tetracycline antibiotics using the ornamental hyperaccumulators *Mirabilis jalapa* L. and *Tagetes patula* L. *Environ Sci Pollut Res*. 2020. 27. P. 14175–14183/ Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07975-2>, date of access 05.04.2022.

28. Manvi Makhijani, Sonal Gahlawat, Kirti Chauhan Phytoremediation potential of *Cicer arietinum* for tetracycline Available at: [https://www.researchgate.net/publication/280520490\\_Phytoremediation\\_potential\\_of\\_Cicer\\_arietinum\\_for\\_tetracycline](https://www.researchgate.net/publication/280520490_Phytoremediation_potential_of_Cicer_arietinum_for_tetracycline), date of access 05.04.2022.

29. Rupali Datta , Padmini Das, Stephanie Smith, Pravin Punamiya, Dil M Ramanathan, Ramana Reddy, Dibyendu Sarkar Phytoremediation potential of vetiver grass [*Chrysopogon zizanioides* (L.)] for tetracycline. *Int J Phytoremediation* 2013;15(4):343-51 doi: 10.1080/15226514.2012.702803.

30. Ninad P. Gujarathi, Bryan J. Haney, and James C. Linden. Phytoremediation Potential of *Myriophyllum*



Aquaticum and Pistia Stratiotes to Modify Antibiotic Growth Promoters, Tetracycline, and Oxytetracycline, in Aqueous Waste. International Journal of Phytoremediation. 2005. 7. P. 99–112

31. Carvalho PN, Basto MC, Almeida CM. Potential of Phragmites australis for the removal of veterinary pharmaceuticals from aquatic media. Bioresour Technol. 2012. Jul;116:497-501. Doi: 10.1016/j.biortech.2012.03.066. Epub 2012 Mar 29. PMID: 22522014.

32. Сивкова Е.Е., Семенов С.Ю. Использование технологии «Constructed wetlands» для очистки сточных вод малых населенных пунктов и предприятий // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2010. № 4 (12). С. 123-129.

33. Björn Berglund, Ghazanfar AliKhan, Stefan E.B.Weisner, Per Magnus Ehde, Jerker Fick, Per-Eric Lindgren. Efficient removal of antibiotics in surface-flow constructed wetlands, with no observed impact on antibiotic resistance genes. Science of the Total Environment. 2014. 476-477. P. 29-37.

34. Chi Y. Hsieh, Ean T. Liaw & Kang M. Fan (2015) Removal of veterinary antibiotics, alkylphenolic compounds, and estrogens from the Wuluo constructed wetland in southern Taiwan, Journal of Environmental Science and Health, Part A, 50:2, 151-160, DOI: 10.1080/10934529.2015.975062

35. Timofeeva S.S., Shupletsova I.D. 2020 Prediction of environmental risks of micro-pollutants in the Baikal region. XXI century. Technosphere Safety 5(3).269–283. Available at: <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2020-3-269-283>, date of access 05.04.2022.

36. Тимофеева С. С., Гудилова О. С. 2021 Антибиотики в окружающей среде: состояние и проблемы // XXI век. Техносферная безопасность. Т. 6. № 3. 251–265. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-3-251-265>

37. Приудзе Г.Н., Чачуа Л.Ш. Тимофеева С.С. Свойства пероксидазы элодеи// Сообщения АН ГССР. 1988. Т.131. №3. С. 609–612.

38. Jonathan Fletcher, Nigel Willby, David M. Oliver and Richard S. Quilliam. 2020. Chapter 7 Phytoremediation Using Aquatic Plants. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/340047038\\_Phytoremediation\\_Using\\_Aquatic\\_Plants](https://www.researchgate.net/publication/340047038_Phytoremediation_Using_Aquatic_Plants), date of access 05.04.2022.

## REFERENCES

1. Terehova V.A., Rudneva I.I., Poromov A.A., Paramonova A.I., Kyidralieva K.A. Distribution and biological effects of antibiotics in aquatic ecosystems (review). Voda: himiya i ekologiya [Water: Chemistry and Ecology], 2019, no. 3-6(119), pp. 92-112. (in Russian)

2. Timofeeva S.S., Shupletsova I.D. Forecasting environmental risks of micro-pollutants in the Baikal region. XXI vek. Tehnosfernaya bezopasnost' [XXI Century. Technosphere Safety], 2020, no. 5(3), pp. 269–283. (in Russian)

3. Bataeva D.S., Zayko E.V. Risks associated with the presence of antimicrobial residues in meat and slaughter products. Teoriya i praktika pererabotki myasa

[Theory and Practice of Meat Processing], 2016, no.1(3), pp. 4–13. (in Russian)

4. Zayko E.V., Bataeva D.S. Identifikatsiya riskov, svyazannykh s syirem zhivotnogo proishozhdeniya. Teoriya i praktika pererabotki myasa [Theory and Practice of Meat Processing], 2018, no. 3(4), pp. 23–31. DOI 10.21323/2414-438X (in Russian)

5. Prozherina Yu. Pharmaceutical waste as a new environmental problem. Remedium, 2017, no. 11, pp. 14–19. (in Russian)

6. Ivanova N.V., Belov A.I., Samarkin A.I. Bioecological consequences of environmental pollution and ways to reduce them. Voennaya meditsina [Military medicine], 2020, no 1, pp. 79-89 (in Russian)

7. Wang, H., Ren, L., Yu, X., Chen, Y, He, G., Jiang, Q. Antibiotic residues in meat, milk and aquatic products in Shanghai and human exposure assessment. Food control, 2017, vol. 80, pp. 217–255.

8. Fang, B., J. Guo, F. Li, J.P. Giesy, L. Wang, and W. Shi. Bioassay directed identification of toxicants in sludge and related reused materials from industrial wastewater treatment plants in the Yangtze River Delta. Chemosphere, 2017, vol. 168, pp. 191–198.

9. Fang, J., Shen, Y., Qu, D., Han, J. Antimicrobial resistance profiles and characteristics of integrons in Escherichia coli strains isolated from a large-scale centralized swine slaughterhouse and its downstream markets in Zhejiang China. Food control, 2019, vol. 95, pp. 215–222.

10. Monitoring global progress on antimicrobial resistance (2018). Available at: <http://www.fao.org/publications/card/en/c/CA0486EN/>. (accessed 5 April 2022).

11. Antoine Gosset, Philippe Polomé, Yves Perrodin. Ecotoxicological risk assessment of micropollutants from treated urban wastewater effluents for watercourses at a territorial scale: Application and comparison of two approaches. International Journal of Hygiene and Environmental Health. 2020 -224-113437. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.113437> (accessed 5 April 2022).

12. Muhammad Arslan, Inaam Ullah, Jochen A. Müller, Naeem Shahid, Muhammad Afzal. Organic Micropollutants in the Environment: Ecotoxicity Potential and Methods for Remediation In book: Enhancing Cleanup of Environmental Pollutants – Biological Approaches Edition: 1 Chapter: Chapter 5 Publisher: Springer International Publishing Editors: Naser Anjum, Saravjeet Gill, Narendra Tuteja Projects: Effect of Selected Organic Micro-Pollutants (OMPs) on Plant Ecology Organic Micropollutants (OMPs) in the Environment: Phytotoxic Potential and Risks for Plant Microflora May 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-55426-6.

13. Hui Gao, Linxiao Zhang, Zihao Lu, Chunming He, Qianwei Li, Guangshui Na Complex migration of antibiotic resistance in natural aquatic environments. Environmental Pollution, 2018, vol. 232, pp. 1-9.

14. Sarmah AK, Meyer MT, Boxall AB. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (Vas) in the environment. Chemosphere, 2006, vol. 65, pp. 725-759.

15. Ding C., and He J. Effect of antibiotics in the environment on microbial populations. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, vol. 87, pp. 925-941.
16. Kummerer K Antibiotics in the aquatic environment-A review-Part I. *Chemosphere*, 2009, vol. 75, pp. 417-434.
17. Chopra I., Roberts M. Tetracycline Antibiotics: Mode of Action, Applications, Molecular Biology, and Epidemiology of Bacterial Resistance. *Microbiology and molecular biology reviews*, 2001, vol. 65, no. 2, pp. 232-260.
18. Barroso J.M. Commission regulation (EU) № 37/2010 of 22 December 2009 on pharmacologically active substances and their classification regarding maximum residue limits in foodstuffs of animal origin. *Official Journal of the European Union*, 2010, vol. 1, no. 15, pp. 1-72.
19. Sovet EEK. Tehnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza TR TS 021/2011 [Technical regulation of the Customs Union TR CU 021/2011], 2019, p. 263.
20. Kollegiya EEK. Reshenie kollegii EEK ot 13 fevralya 2018 goda № 28 «O maksimalno dopustimyyih urovnyah ostatkov veterinarnykh lekarstvennykh sredstv (farmakologicheski aktivnykh veshchestv), kotoryye mogut sodержatsya v neperabotannoy pishchevoy produktsii zhivotnogo proishozhdeniya, v tom chisle v syire, i metodikah ih opredeleniya» [Board of the EEC. Decision of the EEC Board dated February 13, 2018 No. 28 "On the maximum permissible levels of residues of veterinary medicinal products (pharmacologically active substances) that may be contained in unprocessed food products of animal origin, including raw materials, and methods for their determination"], 2018. 66 p.
21. World Health Organization et al. WHO report on surveillance of antibiotic consumption: 2016-2018 early implementation (2018). Available at: <https://www.aidssdatahub.org/sites/default/files/resource/who-report-surveillance> (accessed 5 April 2022).
22. VOZ opublikovala reyting potrebleniya antibiotikov v mire [WHO has published a rating of consumption of antibiotics in the world]. Available at: <https://www.med-practic.com/rus/812/51005/> VOZ opublikovala reyting% 20potrebleniya antibiotikov v mire/article.more.html (accessed 5 April 2022).
23. Baguer Angel J, Jensen John, Krogh Paul Henning. Effects of the antibiotics oxytetracycline and tylosin on soil fauna. *Chemosphere*, 2000, vol 40, no. 7, pp. 751-757.
24. Wen B, Liu Y, Wang P, Wu T, Zhang S, Shan X, Lu J. Toxic effects of chlortetracycline on maize growth, reactive oxygen species generation and the antioxidant response. *J Environ Sci (China)*, 2012, vol. 24, no. 6, pp.1099-1105. DOI: 10.1016/s1001-0742(11)60901-7. PMID: 23505878
25. An J., Zhou Q.X., Liu W.T. Ecotoxicological Effects of Oxytetracycline on Wheat (*Triticum aestivum*) Based on Seed Germination and Seedling Development. *Environmental Science*, 2009, vol. 30, pp. 3022-3027.
26. Chen W., Liu W., Pan N., Jiao W. and Wang M. Oxytetracycline on Functions and Structure of Soil Microbial Community. *Journal of Soil Science and Plant Nutritio*, 2013, vol. 13, pp. 967-975. Available at: <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-95162013005000076> (accessed 5 April 2022).
27. Li X., Zhu W., Meng G. et al. Phytoremediation of alkaline soils co-contaminated with cadmium and tetracycline antibiotics using the ornamental hyperaccumulators *Mirabilis jalapa* L. and *Tagetes patula* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 14175-14183.
28. Manvi Makhijani, Sonal Gahlawat, Kirti Chauhan Phytoremediation potential of *Cicer arietinum* for tetracycline. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/280520490\\_Phytoremediation\\_potential\\_of\\_Cicer\\_arietinum\\_for\\_tetracycline](https://www.researchgate.net/publication/280520490_Phytoremediation_potential_of_Cicer_arietinum_for_tetracycline) (accessed 5 April 2022).
29. Rupali Datta, Padmini Das, Stephanie Smith, Pravin Punamiya, Dil M Ramanathan, Ramana Reddy, Dibyendu Sarkar *Phytoremediation potential of vetiver grass [Chrysopogon zizanioides (L.)] for tetracycline*. *International Journal of Phytoremediation*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 343-351. DOI: 10.1080/15226514.2012.702803.
30. Ninad P. Gujarathi, Bryan J. Haney, and James C. Linden. Phytoremediation Potential of *Myriophyllum Aquaticum* and *Pistia Stratiotes* to Modify Antibiotic Growth Promoters, Tetracycline, and Oxytetracycline, in Aqueous Waste. *International Journal of Phytoremediation*, 2005, vol. 7, pp. 99-112
31. Carvalho PN, Basto MC, Almeida CM. Potential of *Phragmites australis* for the removal of veterinary pharmaceuticals from aquatic media. *Bioresource Technology*, 2012, vol.116, pp. 497-501. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.03.066.
32. Sivkova E.E., Semenov S.Yu. Using the "Constructed wetlands" technology for wastewater treatment of small settlements and enterprises. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* [Bulletin of the Tomsk State University. Biology], 2010, no. 4 (12), pp. 123-129. (in Russian)
33. Björn Berglund, Ghazanfar AliKhan, Stefan E.B. Weisner, Per Magnus Ehde, Jerker Fick, Per-Eric Lindgren. Efficient removal of antibiotics in surface-flow constructed wetlands, with no observed impact on antibiotic resistance genes. *Science of the Total Environment*, 2014, 476-477, pp. 29-37.
34. Chi Y. Hsieh, Ean T. Liaw & Kang M. Fan. Removal of veterinary antibiotics, alkylphenolic compounds, and estrogens from the Wuluo constructed wetland in southern Taiwan, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2015, vol. 50, no. 2, pp. 151-160. DOI: 10.1080/10934529.2015.975062
35. Timofeeva S.S., Shupletsova I.D. 2020 Prediction of environmental risks of micro-pollutants in the Baikal region. *XXI century. Technosphere Safety* 5(3).269-283. Available at: <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2020-3-269-283>, date of access 05.04.2022. (in Russian)
36. Timofeeva S. S., Gudilova O. S.2021 Antibiotiki v okruzhayushey srede: sostoyanie i problemy. *XXI vek. XXI vek. Tehnosfernaya bezopasnost [XXI Century. Technosphere Safety]*, vol. 6, no. 3, pp. 251-265. DOI: 10.21285/2500-1582-2021-3-251-265 (in Russian)

37. Pruidze G.N., Chachua L.Sh. Timofeeva S.S. *Elodea peroxidase properties. Soobsch. AN GSSR* [Communications of the Academy of Sciences of the GSSR], 1988, vol.131, no. 3, pp. 609-612. (in Russian)

38. Fletcher Jonathan, Willby Nigel, Oliver David M., Quilliam Richard S. (2020). Chapter 7 Phytoremediation Using Aquatic Plants. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/340047038\\_Phytoremediation\\_Using\\_Aquatic\\_Plants](https://www.researchgate.net/publication/340047038_Phytoremediation_Using_Aquatic_Plants) (accessed 5 April 2022).

Об авторах:

**ТИМОФЕЕВА Светлана Семеновна**

доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности  
Иркутский национальный исследовательский технический университет  
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83  
E-mail: sstimofeeva@mail.ru

**TIMOFEEVA Svetlana S.**

Doctor of Engineering Science, Head of the Industrial Ecology and Life Safety Chair  
Irkutsk National Research Technical University  
664074, Russia, Irkutsk, Lermontova str., 83  
E-mail: sstimofeeva@mail.ru

**ТЮКАЛОВА Ольга Васильевна**

кандидат химических наук, доцент кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности  
Иркутский национальный исследовательский технический университет  
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83  
E-mail: olgaburlak1@yandex.ru

**TYUKALOVA Olga V.**

PhD in Chemistry, Associate Professor of the Industrial Ecology and Life Safety Chair  
Irkutsk National Research Technical University  
664074, Russia, Irkutsk, Lermontova str., 83  
Russia, E-mail: olgaburlak1@yandex.ru

**УЛЬРИХ Дмитрий Владимирович**

доктор технических наук, доцент, директор архитектурно-строительного института  
Южно-Уральский государственный университет  
454080, Россия, г. Челябинск, просп. В.И. Ленина, 76  
E-mail: ulrikhdv@susu.ru

**ULRIKH Dmitrii V.**

Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Director of the Institute of Architecture and Construction  
South Ural State University  
454080, Russia, Chelyabinsk, Lenin av., 76  
E-mail: ulrikhdv@susu.ru

Для цитирования: Тимофеева С.С., Тюкалова О.В., Ульрих Д.В. Фиторемедиационный потенциал водных растений к тетрациклину в условиях Восточной Сибири // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12, № 3. С. 40–50. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.6.

For citation: Timofeeva S.S., Tyukalova O.V., Ulrikh D.V. Phytoremediation Potential of Aquatic Plants to Tetracycline in Eastern Siberia. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2022, vol. 12, no. 3, pp. 40–50. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.6.