

УДК 57.044

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/03>

Петухов А.С., Кремлева Т.А., Петухова Г.А., Хритохин Н.А.

ОТВЕТНАЯ АНТИОКСИДАНТНАЯ РЕАКЦИЯ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ СРЕДЫ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

A.S. Petukhov, T.A. Kremleva, G.A. Petukhova, N.A. Khritokhin

ANTIOXIDATIVE RESPONSE OF HERBS OF VARIOUS SPECIES TO HEAVY METAL ENVIRONMENTAL POLLUTION

Аннотация. Целью работы стало изучение антиоксидантных систем (содержание фенолов, флавоноидов и активности каталазы) в травянистых растениях различных видов в условиях загрязнения г. Тюмени тяжелыми металлами. Материал для исследования (почвы и травянистые растения: мать-и-мачеха, клевер красный, мятлик луговой, мышиный горошек) отбирали на условно-чистом участке, в районе автотрассы, моторостроительного, нефтеперерабатывающего, аккумуляторного и металлургического завода. Изменение активности антиоксидантных систем в травянистых растениях в условиях загрязнения городской среды тяжелыми металлами оказалось видоспецифичным. В клевере красном и мать-и-мачехе наблюдалось снижение содержания фенолов, флавоноидов и активности каталазы. Для мятлика лугового была отмечена тенденция к уменьшению содержания флавоноидов, но росту содержания фенолов. Наиболее чувствительным видом по антиоксидантному статусу оказался мышиный горошек, а наименее – клевер красный. Изменение активности каталазы оказалось наиболее чувствительным к условиям загрязнения городской среды. Содержание тяжелых металлов в клевере красном и мать-и-мачехе отрицательно коррелировало с уровнем фенолов и флавоноидов, а для мятлика лугового и мышиного горошка отмечены положительные корреляции. Изменение антиоксидантного статуса растений можно рекомендовать как часть комплексного мониторинга загрязнения окружающей среды металлами.

Ключевые слова: тяжелые металлы; растения; фенолы; флавоноиды; каталаза; антиоксиданты.

Сведения об авторах: Петухов Александр Сергеевич, Тюменский государственный университет, revo251@mail.ru; Кремлева Татьяна Анатольевна, д-р хим. наук, Тюменский государственный университет, t.a.kremleva@utmn.ru; Петухова Галина Александровна, д-р биол. наук, Тюменский государственный университет, gpetuhova1@mail.ru; Хритохин Николай Александрович, канд. хим. наук, Тюменский государственный университет, kna@utmn.ru

Abstract. The purpose of this study is the investigation of antioxidant systems (phenolics, flavonoids, and catalase activity) in herbs of various species in conditions of heavy metal pollution of Tyumen. Soil and plant samples (coltsfoot, red clover, meadow grass, and wild vetch) were collected at the control site, highway, engine-building, oil refinery, battery manufacturing, and metallurgical plants. The antioxidant response of herbs to heavy metal accumulation turned out to be species-specific. In red clover and coltsfoot catalase activity, as well as content of phenolics and flavonoids decreased. In meadow grass flavonoids decreased, but phenolics concentration increased. The most resistant and sensitive plant species by antioxidant status was wild vetch. Catalase activity was the most sensitive to metal pollution. The concentration of heavy metals in red clover and coltsfoot negatively correlated with phenols and flavonoids, while in meadow grass and wild vetch positively correlated. Antioxidant status of plants can be recommended as part of the complex monitoring of environmental metal pollution.

Keywords: heavy metals; plants; phenolics; flavonoids; catalase; antioxidants.

About the authors: Alexander S. Petukhov, Tyumen State University, Tyumen, Russia, revo251@mail.ru; Tatyana A. Kremleva, Doctor of Chemical Sciences, Tyumen State University, Tyumen, Russia, t.a.kremleva@utmn.ru; Galina A. Petukhova, Doctor of Biological Sciences, Tyumen, Russia, gpetuhova1@mail.ru; Nikolay A. Khritokhin, Candidate of Chemical Sciences, Tyumen State University, Tyumen, Russia, kna@utmn.ru

Петухов А.С., Кремлева Т.А., Петухова Г.А., Хритохин Н.А. Ответная антиоксидантная реакция травянистых растений различных видов на загрязнение среды тяжелыми металлами // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 25-36. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/03>

Petukhov, A.S., Kremleva, T.A., Petukhova, G.A., & Khritokhin, N.A. (2024). Antioxidative Response of Herbs of Various Species to Heavy Metal Environmental Pollution. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(66), 25-36. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/03>

Введение. Антропогенное загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ) является одной из наиболее распространенных и опасных экологических проблем. Накопление ТМ в почвах приводит к снижению плодородия, подавлению роста и развития растений [14]. ТМ нарушают минеральное питание растений, водный обмен, процессы дыхания [28]. Поглощение растениями ТМ сопровождается и рядом биохимических изменений.

В силу своей способности связываться с функциональными группами биомолекул, менять степень окисления и замещать ионы других металлов, ТМ способны вызывать в клетках растений окислительный стресс [13; 30]. Смещение окислительно-восстановительного равновесия сказывается на активности антиоксидантных систем неферментной природы (фенолы, флавоноиды и другие), а также ферментной природы (каталаза, пероксидаза, супероксиддисмутаза) [17]. С одной стороны, ТМ могут повреждать структуру и биосинтез антиоксидантов, с другой, стресс, создаваемый накоплением металлов, вынуждает растения активировать антиоксиданты для обрыва цепей свободнорадикального окисления, связывания активных форм кислорода и блокирования окислительных процессов [2; 17; 21].

Изучение активности антиоксидантных систем растений в условиях накопления металлов может являться частью биомониторинга антропогенно нарушенных территорий с целью установления степени токсичности загрязнения. Взаимосвязь между содержанием металлов и антиоксидантным статусом растений позволяет исследовать механизмы воздействия ТМ, а также выявлять наиболее чувствительные антиоксиданты. Целью работы стало изучение антиоксидантных систем (содержание фенолов, флавоноидов и активности каталазы) в травянистых растениях различных видов в условиях загрязнения г. Тюмени тяжелыми металлами.

Материал и методы исследования. Материал для исследования отобран в конце июля 2018 г. в г. Тюмени. Пробы почв и растений отбирали в условно-чистом районе за городом, вблизи автотрассы (30 метров от дороги) на удалении 30 км от г. Тюмени, и на расстоянии 200 метров от следующих предприятий: «Тюменский аккумуляторный завод» (Аккумуляторный завод), «Антипинский нефтеперерабатывающий завод» (НПЗ), «Тюменские моторостроители» (Моторный завод), и «УГМК-Сталь». Все изученные почвы относились к дерново-подзолистому подтипу, характерному для района исследования.

Отбирали надземную часть травянистых растений: мышиный горошек (*Vicia cracca* L.), клевер красный (*Trifolium rubens* L.), мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.). Данные виды растений были выбраны благодаря их широкому распространению в районе исследования. Усредненная проба состояла из 100 растений каждого вида, отобранных с пяти точек на каждом участке. Поверхностный слой почвы (0–10 см) отбирали методом конверта, усредняли, перетирали и просеивали.

Анализ содержания ТМ проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе «ContrAA 700» (Analytic Jena, Германия). В почвах определяли подвижные формы металлов с помощью ацетатно-аммонийного буфера pH=4,8 [10], а также кислоторастворимую форму при помощи 5 М HNO₃ [12]. Содержание металлов в растениях определяли экстракцией 5 М HNO₃ из золы растений.

Содержание флавоноидов определяли при помощи фотометрической реакции AlCl₃ со спиртовыми экстрактами растений, измерения проводили на $\lambda=410$ нм [3]. Растительные фенолы определяли в водном экстракте растений титрованием KMnO₄ с фиолетового до золотисто-желтого окрашивания по индигокармину [9]. Активность каталазы исследовали проведением фотометрической реакции молибдата аммония с перекисью водорода в водных экстрактах растений, измерения проводили на $\lambda=470$ нм [5].

Все измерения проводили в трех параллелях. Результаты анализов были подвергнуты стандартной статистической обработке в программе Statistica 10. Рассчитывали среднее значение, стандартную ошибку, доверительный интервал, сравнение выборок проводили по t-критерию Стьюдента при уровне доверительной вероятности $P \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение. Содержание ТМ в почвах и растениях г. Тюмени было описано ранее в нашей предыдущей работе [26]. Содержание Cu, Zn, Fe и Mn в почвах г. Тюмени превышало контроль на всех изученных участках. Максимальное содержание всех ТМ в почве было зарегистрировано в районе металлургического и аккумуляторного завода. Содержание Cu в растениях было в диапазоне 3–13 мг/кг. Способность к накоплению Cu растениями относительно контроля убывала в ряду: мышиный горошек>мать-и-мачеха>клевер красный>мятлик луговой. Содержание Zn в растениях изменялось от 13 до 61 мг/кг. Аккумуляция Zn травами убывала в ряду: мать-и-мачеха>мышиный горошек>мятлик луговой>клевер красный. Во всех изученных видах растений в условиях городской среды наблюдалась аккумуляция Fe по сравнению с контролем. Наиболее значима аккумуляция Fe была зарегистрирована в районе аккумуляторного и металлургического завода, с максимальным превышением контроля до 17 раз для мать-и-мачехи вблизи металлургического завода. Вероятно, это обусловлено работой сталеплавильных цехов. Содержание Mn в растениях изменялось в пределе от 17 до 152 мг/кг. Аккумуляция Mn относительно контроля была характерна для всех видов растений, но только в районе автотрассы и металлургического завода. Это может быть обусловлено применением Mn в качестве легирующих добавок и антидетонационных присадок в бензине.

Ответная реакция антиоксидантных систем растений на загрязнение городской среды тяжелыми металлами оказалось видоспецифичной.

Содержание фенолов и флавоноидов в клевере красном было снижено, на 10–40% (рис. 1, 2). Аналогичная картина наблюдалась для мать-и-мачехи, содержание фенолов и флавоноидов было ниже контроля до 50–60%. Возможно, снижение концентрации фенолов и флавоноидов связано с хелатированием ионов металлов гидроксильными, карбонильными и карбоксильными группами этих соединений [20; 24; 25]. Кроме того, возможно нарушение биосинтеза фенолов тяжелыми металлами. Были зарегистрированы отрицательные корреляции между содержанием Cu и уровнем флавоноидов в клевере красном ($R=-0,93$) и мать-и-мачехе ($R=-0,87$). Содержание подвижной формы Cu в почве отрицательно коррелировало с уровнем флавоноидов в клевере красном ($R=-0,67$), а содержание Mn было в обратной взаимосвязи с концентрацией фенолов ($R=-0,78$). Содержание Cu, Zn и Mn в мать-и-мачехи отрицательно коррелировало с уровнем флавоноидов ($R=-0,87$; $-0,89$; $-0,80$ соответственно), в то время как содержание Mn, Fe и Zn отрицательно коррелировало с концентрацией фенолов ($R=-0,79$; $-0,70$; $-0,66$).

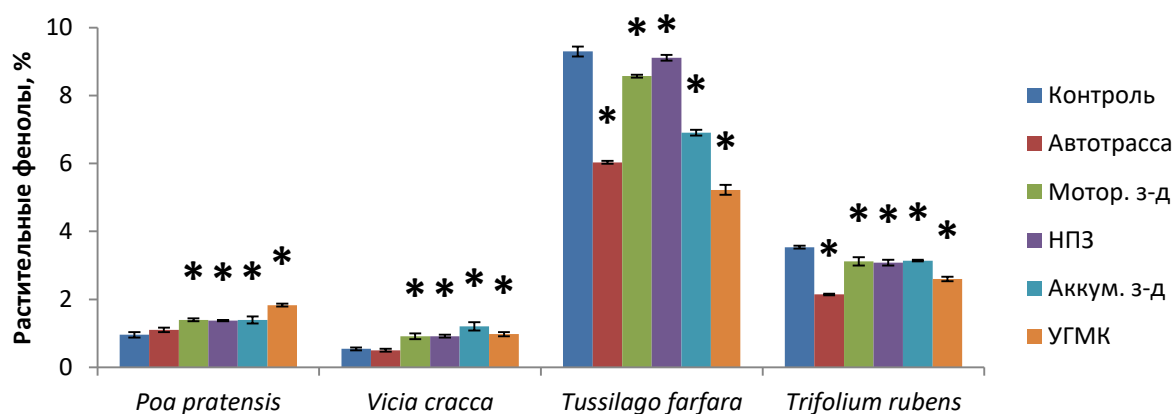


Рис. 1. Содержание фенольных антиоксидантов в травянистых растениях г. Тюмени

Примечание: планки погрешности указывают доверительный интервал при $P \leq 0,05$

*- статистически достоверные различия между контролем и вариантом опыта (при $P \leq 0,05$)

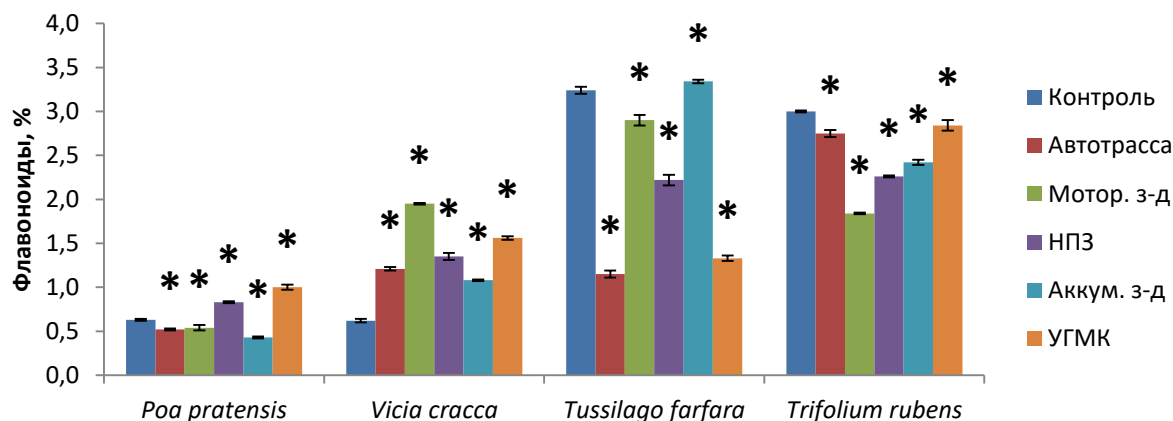


Рис. 2. Содержание флавоноидов в травянистых растениях г. Тюмени

В условиях стресса от ТМ в клетках растений могут развиваться радикальные процессы окисления, фенольные соединения обладают антиоксидантной функцией и могут расходоваться на связывание свободных радикалов. При этом фенолы превращаются в феноксильные радикалы, обладающие окислительной способностью [22]. Поэтому синтез флавоноидов при накоплении феноксильных радикалов может быть ингибирован в условиях высокого антропогенного загрязнения. Фенолы и флавоноиды сами могут быть окислены активными формами кислорода, что также приводит к снижению их содержания.

Снижение содержания флавоноидов в условиях городской среды было обнаружено в горце птичьим [1]. Содержание фенольных антиоксидантов в травянистых растениях г. Калининграда было также снижено по сравнению с фоном [23]. Листья мать-и-мачехи обладают лекарственными свойствами [29], однако понижение уровня антиоксидантов в условиях загрязнения окружающей среды может снижать ценность и эффективность такого сырья.

В клетках мышиного горошка наблюдалась противоположная картина: содержание фенолов и флавоноидов было повышено практически на всех участках по сравнению с контролем в 1,7–3,1 раза (рис. 1, 2). В клетках мятлика лугового содержание фенолов было также повышено, по сравнению с контролем, на большинстве участков, как минимум, на 40% (рис. 1). Однако изменение содержания флавоноидов в клетках мятлика лугового было неоднозначным: концентрация флавоноидов была ниже контроля вблизи автотрассы, моторостроительного и аккумуляторного завода, но повышена в районе аккумуляторного и металлургического заводов, характеризующихся более высоким содержанием ТМ в почвах (рис. 2). В отличие от мать-и-мачехи и клевера красного, для мышиного горошка и мятлика лугового наблюдались положительные корреляции между содержанием ТМ и уровнем фенольных антиоксидантов. Так, для мышиного горошка содержание Cu положительно коррелировало с уровнем флавоноидов ($R=0,88$), а Zn – с фенолами ($R=0,60$). Кроме того, содержание подвижной формы Mn в почве также положительно коррелировало с концентрацией флавоноидов ($R=0,70$), а уровень фенолов в клетках был положительно связан с концентрацией кислоторастворимой формы Cu и Zn в почвах ($R=0,94$; $0,83$). Содержание Zn в мятлике луговом положительно коррелировало с уровнем флавоноидов ($R=0,91$), Fe и Zn также коррелировали с фенолами ($R=0,89$, $0,78$ соответственно).

Увеличение содержания флавоноидов может быть обусловлено необходимостью растений повышать свой антиоксидантный статус в условиях накопления в клетках свободных радикалов и активных форм кислорода. Флавоноиды способны связывать супероксидный анион-радикал [24], а также подавляют активность ферментов, генерирующих активные формы кислорода [30]. Флавоноиды способны подавлять окисление клеточных мембран путем сорбции [25]. Процессы фотосинтеза, дыхания и роста растений подавляются при накоплении ТМ, флавоноиды принимают участие в этих процессах, поэтому их дополнительный синтез может компенсировать токсический эффект

металлов. В предыдущих исследованиях выявлено увеличение содержания флавоноидов в горце птичьим в районе газоперерабатывающего завода [8].

Изменение активности каталазы в клетках растений оказалось видоспецифичным. В литературе сообщалось о видоспецифичном изменении активности каталазы в клетках растений при поливе растворами ТМ [31] и выращивании в почве, загрязненной Ni, Pb, Cu и Zn [18]. В клетках мятлика лугового активность каталазы была снижена в районе НПЗ и УГМК до 70%. В клетках клевера красного активность каталазы была снижена по сравнению с контролем практически во всех районах исследования (рис. 3), при этом активность каталазы отрицательно коррелировала с содержанием кислоторастворимой формы Fe в почве ($R=-0,61$).

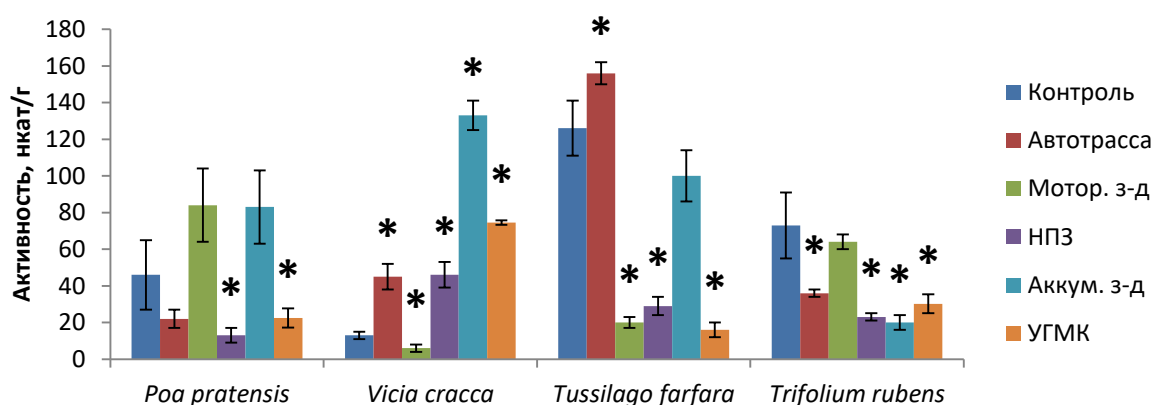


Рис. 3. Активность каталазы в травянистых растениях г. Тюмени

Снижение активности каталазы может быть обусловлено повреждением структуры фермента и нарушением путей ее биосинтеза. ТМ могут связываться с тиольными, amino и карбоксильными группами аминокислот каталазы или ферментов ее биосинтеза, что приведет к снижению активности каталазы. Накопление металлов в клетках провоцирует окислительный стресс, образующиеся активные формы кислорода могут также повредить структуру каталазы путем окисления углеводородного скелета аминокислот. В других исследованиях описано отрицательное влияние Cd на активность каталазы в проростках пшеницы [4] и кресс-салата [7]. О снижении активности каталазы в клевере в условиях городской среды сообщалось в литературе [11]. Металлы, обладающие близким ионным радиусом к иону Fe^{2+} , могут замещать железо в составе гема, что также снизит активность каталазы.

Изменение активности каталазы в клетках мать-и-мачехи оказалось неоднозначным. Активность фермента была снижена практически на всех участках, за исключением автотрассы. Район автотрассы можно рассматривать как участок с относительно невысокой антропогенной нагрузкой (т. к. отсутствуют промышленные предприятия в непосредственной близости). В условиях низкой антропогенной нагрузки активность каталазы была увеличена, вероятно, из-за повышенной необходимости утилизировать

перекись водорода, однако при увеличении уровня стресса, активность фермента снизилась по вышеописанным причинам.

Изменение активности каталазы в мышином горошке оказалось также неоднозначным (рис. 3). В клетках мышиного горошка активность каталазы была повышена на всех участках, за исключением моторостроительного завода, при этом выявлены положительные корреляции между содержанием кислоторастворимой формы Cu, Zn и Fe и активностью каталазы ($R=0,74; 0,84; 0,86$ соответственно).

Активность каталазы в клетках растений может быть повышена в связи с накоплением в клетках перекиси водорода, окисляющей липидный слой мембран. В литературе сообщалось, что обработка растений сточными водами с высоким содержанием ТМ [6] или раствором хлорида кадмия [15] приводит к увеличению активности каталазы в клетках. Увеличение активности каталазы в условиях городской среды наблюдалось ранее в травянистых растениях [27], а также в древесных растениях [19].

Заключение. Таким образом, изменение активности антиоксидантных систем в травянистых растениях в условиях загрязнения городской среды тяжелыми металлами оказалось видоспецифичным. В клетках мать-и-мачехи и клевера красного наблюдалось снижение содержания фенолов, флавоноидов и активности каталазы. Для мятлика лугового была отмечена тенденция к уменьшению содержания флавоноидов, но росту содержания фенолов. Снижение антиоксидантного статуса растений свидетельствует об угнетении жизнедеятельности растений в городской среде и о возможном сокращении численности и видового разнообразия растений, а также о снижении ценности использования растений для лекарственных целей. Наиболее чувствительным видом по антиоксидантному статусу оказался мышиный горошек, а наименее – клевер красный. Изменение активности каталазы оказалось наиболее чувствительным к условиям загрязнения городской среды. Содержание тяжелых металлов в клевере красном и мать-и-мачехе отрицательно коррелировало с уровнем фенолов и флавоноидов, а для мятлика лугового и мышиного горошка отмечены положительные корреляции. Изменение антиоксидантного статуса можно рекомендовать как часть комплексного мониторинга загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Тюменской области №20-45-720011

Литература

1. Великанова Н.А., Сливкин А.И., Гапонов С.П. Изучение накопления флавоноидов травой горца птичьего, собранного в разных с экологической точки зрения районах города Воронежа и его окрестностей // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2013. № 1. С.181-185.

2. Гарифзянов А.Р., Жуков Н.Н., Иванищев В.В. Образование и физиологические реакции активных форм кислорода в клетках растений // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 2. С. 2-2.
3. Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П., Перуанский Ю.В., Луковникова Г.А., Иконникова М.И. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. С. 41-43.
4. Колесниченко В.В., Колесниченко А.В. Изучение влияния высокой концентрации кадмия на функционирование антиоксидантных систем этиолированных проростков пшеницы разной длины // Journal of Stress Physiology and Biochemistry. 2011. № 3. Pp. 212-221.
5. Королук М.А., Иванова Л.И., Майорова Н.О., Токарев В.Е. Метод определения активности каталазы // Лабораторное дело. 1988. № 1. С. 16.
6. Мурзаева С.В. Накопление тяжелых металлов и активность антиоксидантных ферментов в пшенице при воздействии сточных вод // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2002. Т.4. № 2. С. 260-269.
7. Науменко О.А., Саблина Е.В., Кабышева М.И., Костенецкая Е.А. Исследование механизма повреждающего действия избыточных концентраций кадмия на состояние антиоксидантных ферментов кресс-салата // Вестник Оренбургского государственного университета. 2013. Т. 159, №10. С. 205-207.
8. Немерешина О.Н., Гусев Н.Ф., Петрова Г.В., Шайхутдинова А.А. Некоторые аспекты адаптации *Polygonum aviculare* L. к загрязнению почвы тяжелыми металлами // Известия ОГАУ. 2012. № 1(1).
9. Общая фармакопейная статья 1.5.3.0008.15. Определение содержания дубильных веществ в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах. М., 2015. 4 с.
10. ПНД Ф 16.1:2.2.2:2.3.78-2013 Методика измерения массовой доли подвижных форм металлов: меди, цинка, свинца, кадмия, марганца, никеля, кобальта, хрома в пробах почв, грунтов, донных отложений, осадков сточных вод методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии. М., 2013.
11. Половникова М.Г., Воскресенская О.Л. Активность компонентов антиоксидантной защиты и полифенолоксидазы у газонных растений в онтогенезе в условиях городской среды // Физиология растений. 2008. № 55(5). С. 777-785.
12. Руководящий документ РД 52.18.191-2018. Массовая доля кислоторастворимых форм металлов в пробах почв, грунтов и донных отложений. Обнинск, 2019.
13. Скугорева С.Г., Ашихмина Т.Я., Фокина А.И., Лялина Е.И. Химические основы токсического действия тяжелых металлов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 1. С. 1-10.
14. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.

15. Anjum S.A., Tanveer M., Hussain S., Bao M., Wang L., Khan I. Cadmium toxicity in maize (*Zea mays* L.): consequences on antioxidative systems, reactive oxygen species and cadmium accumulation // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. №21. Pp. 17022-17030.
16. Arif N., Yadav V., Singh S., Kushwaha B.K., Singh S., Trupathi D.K. et al. Assessment of antioxidant potential of plants in response to heavy metals // *Plant Response to Xenobiotics*. 2016. Pp. 97-125.
17. Ghorri N.H., Ghorri T., Hayat M.Q., Imadi S.R., Gul A., Altay V., Ozturk M. Heavy metal stress and responses in plants // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019. № 16. Pp. 1807-1828.
18. Kachout S.S., Ben Mansoura A., Leclerc J.C., Mechergui R., Rejeb M.N., Ouerghi Z. Effects of heavy metals on antioxidant activities of *Artiplex hortensis* and *A. rosea* // *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 2009. № 7. Pp. 938-945.
19. Khosropour E., Attarod P., Shirvany A. et al. Response of *Platanus orientalis* leaves to urban pollution by heavy metals // *Journal of forestry research*. 2019. T. 30. C. 1437-1445.
20. Lachman J., Dudjak J., Miholova D., Kolihoiva D. Effect of cadmium on flavonoid content in young barley (*Hordeum sativum* L.) plants // *Plant, Soil and Environment*. 2005. № 11. Pp. 513-516.
21. Maleki M., Ghorbanpour M., Kariman K. Physiological and antioxidative responses of medicinal plants exposed to heavy metal stress // *Plant Gene*. 2017. № 7. Pp. 247-254.
22. Marquez-Garcia B., Angeles-Fernandez-Recamales M., Cordoba F. Effects of cadmium on phenolic composition and antioxidant activities of *Erica andevalensis* // *Journal of Botany*. 2012. № 91. Pp. 91-98.
23. Maslennikov P.V., Chupakhina G.N., Skrypnik L.N., Feduraev P.V., Melnik A.S. Assessment of the antioxidant potential of plants in urban ecosystems under conditions of anthropogenic pollution of soils // *Russian Journal of Ecology*. 2018. № 49(5). Pp. 384-394.
24. Michalak A. Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress // *Polish journal of environmental studies*. 2006. № 15. Pp. 523-530.
25. Mierziak J., Kostyn K., Kulma A. Flavonoids as important molecules of plant interaction with the environment // *Molecules*. 2014. № 19. Pp. 16240-16265.
26. Petukhov A.S., Kremleva T.A., Petukhova G.A., Khritokhin N.A. Translocation of Heavy Metals in Herbs under Urban Anthropogenic Pollution Conditions // *Environmental Processes*. 2020. № 7. Pp. 1173-1196.
27. Rai P.K. Biodiversity of roadside plants and their response to air pollution in an Indo-Burma hotspot region: implications for urban ecosystem restoration // *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*. 2015. №9(1). P. 47-55.
28. Rai P.K., Lee S.S., Zhang M., Tsang Y.F., Kim K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management // *Environment International*. 2019. № 125. Pp. 365-385.
29. Shikov A.N., Pozharitskaya O.N., Makarov V.G., Wagner H., Verpoorte R., Heinrich M.. Medicinal plants of the Russian pharmacopeia; their history and applications // *Journal of Ethnopharmacology*. 2014. № 154. Pp. 481-536.

30. Skorzynska-Polit E. Lipid peroxidation on plant cells, its physiological role and changes under heavy metal stress // *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 2007. №74. Pp. 49-54.

31. Zhang F.Q., Wang Y.S., Lou Z.P., Dong J.D. Effect of heavy metal stress on antioxidant enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza*) // *Chemosphere*. 2007. № 67. Pp. 44-50.

References

1. Velikanova, N.A., Slivkin, A.I., & Gaponov, S.P. (2013). Izuchenie nakoplenija flavonoidov travoj gorca ptich'ego, sobrannogo v raznyh s jekologicheskoj točki zrenija rajonah goroda Voronezha i ego okrestnostej. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Himija. Biologija. Farmacija*, 1, 181-185. (in Russ.).

2. Garifzjanov, A.R., Zhukov, N.N., & Ivanishhev, V.V. (2011). Formation and physiological reactions of oxygen active forms in plants cells. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*, 2, 2-2 (in Russ.).

3. Ermakov, A.I., Arasimovich, V.V., Yarosh, N.P., Peruansky, Yu.V., Lukovnikova, G.A., & Ikonnikova, M.I. (1987). *Metody biohimicheskogo issledovanija rastenij*. Leningrad. (in Russ.).

4. Kolesnichenko, V.V., & Kolesnichenko, A.V. (2011). The influence of high Cd^{2+} concentration on antioxidant system of wheat etiolated shoots with different length. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*, 3, 212-221. (in Russ.).

5. Koroljuk, M.A., Ivanova, L.I., Majorova, N.O., & Tokarev, V.E. Metod opredelenija aktivnosti katalazy. *Laboratornoe delo*, 1, 16. (in Russ.).

6. Murzaeva, S.V. (2002). The accumulation of heavy metals and the activity of antioxidative enzymes in wheat exercise influence of sewages. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 4(2), 260-269. (in Russ.).

7. Naumenko, O.A., Sablina, E.V., Kabysheva, M.I., & Kosteneckaja, E.A. (2013). Issledovanie mehanizma povrezhdajushhego dejstvija izbytochnyh koncentracij kadmija na sostojanie antioksidantnyh fermentov kress-salata. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 159(10), 205-207. (in Russ.).

8. Nemereshina, O.N., Gusev, N.F., Petrova, G.V., & Shajhutdinova, A.A. (2012). Nekotorye aspekty adaptacii *Polygonum aviculare* L. k zagriznzeniju pochvy tjazhelymi metallami. *Izvestija OGAU*, 1(1). (in Russ.).

9. Obshhaja farmakopejnaja stat'ja 1.5.3.0008.15. *Opredelenie sodержanija dubil'nyh veshhestv v lekarstvennom rastitel'nom syr'e i lekarstvennyh rastitel'nyh preparatah*. (in Russ.).

10. PND F 16.1:2:2.2:2.3.78-2013. *Metodika izmerenija massovoj doli podvizhnyh form metallov: medi, cinka, svinca, kadmija, marganca, nikelja, kobal'ta, hroma v probah pochv, gruntov, donnyh otlozhenij, osadkov stochnyh vod metodom plamennoj atomno-absorbcionnoj spektrometrii*. (in Russ.).

11. Polovnikova, M.G., & Voskresenskaja, O.L. (2008). Aktivnost' komponentov antioksidantnoj zashhity i polifenoloksidazy u gazonnyh rastenij v ontogeneze v uslovijah gorodskoj sredy. *Fiziologija rastenij*, 55(5), 777-785. (in Russ.).

12. Rukovodjashhij dokument RD 52.18.191-2018. *Massovaja dolja kislotorastvorimyh form metallov v probah pochv, gruntov i donnyh otlozhenij*. (in Russ.).
13. Skugoreva, S.G., Ashihmina, T.Ja., Fokina, A.I., & Ljalina, E.I. (2016). Chemical groups of toxic effect of heavy metals (review). *Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija*, 1, 1-10. (in Russ.).
14. Titov, A.F., Kaznina, N.M., & Talanova, V.V. (2014). *Tjzhelye metally i rastenija*. Petrozavodsk. (in Russ.).
15. Anjum, S.A., Tanveer, M., Hussain, S., Bao, M., Wang, L., & Khan, I. (2015). Cadmium toxicity in maize (*Zea mays* L.): consequences on antioxidative systems, reactive oxygen species and cadmium accumulation. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 17022-17030.
16. Arif, N., Yadav, V., Singh, S., Kushwaha, B.K., Singh, S., & Trupathi, D.K. et al. (2016). Assessment of antioxidant potential of plants in response to heavy metals. *Plant Response to Xenobiotics*, 97-125.
17. Ghor, N.H., Ghor, T., Hayat, M.Q., Imadi, S.R., Gul, A., Altay, V., & Ozturk, M. (2019). Heavy metal stress and responses in plants. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 1807-1828.
18. Kachout, S.S., Ben Mansoura, A., Leclerc, J.C., Mechergui, R., Rejeb, M.N., & Ouerghi, Z. (2009). Effects of heavy metals on antioxidant activities of *Artiplex hortensis* and *A. rosea*. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 7, 938-945.
19. Khosropour, E., Attarod, P., & Shirvany, A. et al. (2018). Response of *Platanus orientalis* leaves to urban pollution by heavy metals. *J. For. Res.*, 30.
20. Lachman, J., Dudjak, J., Miholova, D., & Kolihova, D. (2005). Effect of cadmium on flavonoid content in young barley (*Hordeum sativum* L.) plants. *Plant, Soil and Environment*, 11, 513-516.
21. Maleki, M., Ghorbanpour, M., & Kariman, K. (2017). Physiological and antioxidative responses of medicinal plants exposed to heavy metal stress. *Plant Gene*, 7, 247-254.
22. Marquez-Garcia, B., Angeles-Fernandez-Recamales, M., & Cordoba, F. (2012). Effects of cadmium on phenolic composition and antioxidant activities of *Erica andevalensis*. *Journal of Botany*, 91, 91-98.
23. Maslennikov, P.V., Chupakhina, G.N., Skrypnik, L.N., Feduraev, P.V., & Melnik, A.S. (2018). Assessment of the antioxidant potential of plants in urban ecosystems under conditions of anthropogenic pollution of soils. *Russian Journal of Ecology*, 49, 384-394.
24. Michalak, A. (2006). Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15, 523-530.
25. Mierziak, J., Kostyn, K., & Kulma, A. (2014). Flavonoids as important molecules of plant interaction with the environment. *Molecules*, 19, 16240-16265. (in Russ.).
26. Petukhov, A.S., Kremleva, T.A., Petukhova, G.A., & Khritokhin, N.A. (2020). Translocation of Heavy Metals in Herbs under Urban Anthropogenic Pollution Conditions. *Environmental Processes*, 7, 1173-1196.

27. Rai, P.K. (2015). Biodiversity of roadside plants and their response to air pollution in an Indo-Burma hotspot region: implications for urban ecosystem restoration. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 9, 47-55.
28. Rai, P.K., Lee, S.S., Zhang, M., Tsang, Y.F., & Kim, K. (2019). Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management. *Environment International*, 125, 365-385.
29. Shikov, A.N., Pozharitskaya, O.N., Makarov, V.G., Wagner, H., Verpoorte, & R., Heinrich, M. (2014). Medicinal plants of the Russian pharmacopeia; their history and applications. *Journal of Ethnopharmacology*, 154, 481-536
30. Skorzyńska-Polit, E. (2007). Lipid peroxidation on plant cells, its physiological role and changes under heavy metal stress. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 74, 49-54.
31. Zhang, F.Q., Wang, Y.S., Lou, Z.P., & Dong, J.D. (2007). Effect of heavy metal stress on antioxidant enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*). *Chemosphere*, 67, 44-50.

дата поступления: 19.01.2023

дата принятия: 30.11.2023

© Петухов А.С., Кремлева Т.А., Петухова Г.А., Хритохин Н.А., 2024