

УДК 581.1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ *TRITICUM AESTIVUM* L. (POACEAE, POALES) И *PISUM SATIVUM* L. (FABACEAE, FABALES) К ТЯЖЕЛЫМ МЕТАЛЛАМ

Е. А. Ерофеева

Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н. И. Лобачевского
Россия, 603950, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
E-mail: ele77785674@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.04.2019 г., после доработки 11.11.2019 г., принята 14.12.2019 г.

Ерофеева Е. А. Сравнительный анализ устойчивости *Triticum aestivum* L. (Poaceae, Poales) и *Pisum sativum* L. (Fabaceae, Fabales) к тяжелым металлам // Поволжский экологический журнал. 2020. № 2. С. 165 – 176. DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2020-2-165-176>

Тяжелые металлы являются одними из распространенных загрязнителей почв, в том числе и сельскохозяйственных угодий. При этом уровень загрязнения может значительно превышать нормативы. Горох посевной (*Pisum sativum* L.) и пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.) являются важнейшими сельскохозяйственными культурами. В то же время сравнительный анализ видовых особенностей устойчивости *T. aestivum* и *P. sativum* к воздействию высоких концентраций тяжелых металлов не проводился. В связи с этим нами в условиях эксперимента была оценена в сравнительном плане устойчивость проростков *T. aestivum* и *P. sativum* к хроническому воздействию концентраций солей свинца и меди, находящихся в диапазоне летальных значений для *T. aestivum* (0.15, 0.30 и 0.60 г/л сульфата меди; 0.5, 1.0 и 1.5 г/л нитрата свинца). Все изученные концентрации токсикантов вызвали снижение всхожести семян *T. aestivum* относительно контроля на 19 – 38% при воздействии нитрата свинца и на 23 – 58% – сульфата меди, что указывало на проявление летального эффекта. Сульфат меди и нитрат свинца во всех концентрациях вызвали значительное снижение длины корневой системы (от 69% до 25 раз) и высоты побега (на 25 – 76%) по сравнению с контрольным уровнем у проростков *T. aestivum*, а также приводили к увеличению интенсивности перекисного окисления липидов в побеге проростков, свидетельствующее о развитии стрессовой реакции. В то же время изученные концентрации солей тяжелых металлов, находящиеся в летальном диапазоне для *T. aestivum*, не вызвали практически никаких нарушений изученных показателей у *P. sativum* за исключением уменьшения длины корневой системы относительно контроля при воздействии нитрата свинца. Таким образом, у *P. sativum* прорастание семян, ростовые процессы корневой системы и побега, а также перекисный гомеостаз у проростков являются значительно более устойчивыми к воздействию изученных концентраций нитрата свинца и сульфата меди по сравнению с аналогичными параметрами *T. aestivum*.

Ключевые слова: *Triticum aestivum*, *Pisum sativum*, свинец, медь, линейные размеры проростков, всхожесть семян, перекисное окисление липидов.

DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2020-2-165-176>

ВВЕДЕНИЕ

Транспортные средства и промышленность (угледобывающая, металлургическая, химическая, энергетическая) являются основными источниками поступления

тяжелых металлов в окружающую среду (Титов и др., 2014; Su et al., 2014). Вдоль дорог с активным движением автотранспорта тяжелыми металлами загрязняется полоса земли шириной 50 – 100, реже 300 м. Основное же количество их оседает на почву в пределах 10 – 15 м и концентрируется в слое глубиной до 10 см (Денисов, Рогалев, 2005). Тяжелые металлы, поступая в почву даже в небольших количествах, способны аккумулироваться и длительно сохраняться в почве, в частности связываясь с компонентами гумуса. Особенно прочно закрепляются на гумусовом барьере элементы-органотрофы: медь и свинец (Водяницкий, 2008). Так, период полуудаления свинца из почвы составляет 740 – 5900 лет, а для меди этот период равен 310 – 1500 лет (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Загрязнению тяжелыми металлами подвергаются и почвы сельскохозяйственных угодий, расположенные вблизи автодорог. Другим путем поступления в них тяжелых металлов является использование минеральных и органических удобрений, средств защиты растений (фунгицидов, гербицидов и др.), содержащих данные элементы (Титов и др., 2011; Водяницкий, 2013; Xu et al., 2017), а также поступление тяжелых металлов с неполно очищенными промышленными и коммунальными сточными водами в водоемы, а затем на орошаемые земли (Водяницкий, 2013; Su et al., 2014). При этом в пахотных землях может наблюдаться значительное превышение нормативов для содержания тяжелых металлов (Micó et al., 2006). Так, например, в Тюменской области зафиксировано превышение ПДК кадмия в 12 раз в результате внесения больших доз минеральных удобрений (Водяницкий, 2013).

Горох посевной (*Pisum sativum* Linnaeus, 1753) и пшеница мягкая (*Triticum aestivum* Linnaeus, 1753) являются важнейшими сельскохозяйственными культурами. Имеются многочисленные исследования, посвященные устойчивости данных культур к различным тяжелым металлам (Петрова, Райхерт, 2013; Пухальский и др., 2017; Belimov et al., 2018; Fagorzi et al., 2018 и др.). В то же время сравнительный анализ видовых особенностей устойчивости *T. aestivum* и *P. sativum* к воздействию тяжелых металлов не проводился. Показано, что некоторые виды дикорастущих бобовых растений придорожных территорий значительно более устойчивы к воздействию этих поллютантов, чем небобовые растения (Савинов и др., 2007). Другими авторами, напротив, указывается на более высокую устойчивость злаков по сравнению с бобовыми к тяжелым металлам, в частности к кадмию (Серёгин, Иванов, 2001). Ранее нами установлено, что наиболее четкое представление о видовой специфике резистентности растений к поллютантам можно получить при воздействии сублетальных и летальных концентраций, при которых максимально активируются защитные системы растений (Ерофеева, 2012, 2014, 2018).

В связи с вышеуказанным в условиях эксперимента, позволяющих в высокой степени контролировать концентрацию доступного растению тяжелого металла, был проведен сравнительный анализ устойчивости проростков *T. aestivum* и *P. sativum* к воздействию высоких концентраций солей тяжелых металлов на примере сульфата меди и нитрата свинца, находящихся в диапазоне летальных значений для *T. aestivum*. Выбор данных тяжелых металлов для исследования был обусловлен тем, что на придорожных территориях для них достаточно часто наблюдается пре-

вышение нормативов, разработанных для почвы (Гелашвили и др., 2007), а также различным значением указанных элементов для растений. Известно, что, в отличие от свинца, медь относится к микроэлементам растений, поскольку входит в состав таких ферментов, как супероксиддисмутазы, полифенолоксидазы, аскорбатоксидазы, цитохромоксидазы, а также белка пластоцианина, осуществляющего перенос электронов между фотосистемами I и II (Полесская, 2007; Yruela, 2005).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Было проведено две серии экспериментов. В первой серии изучали воздействие нитрата свинца на состояние *P. sativum* сорта Стабел и *T. aestivum* сорта Московская 59, во второй – сульфата меди на эти же виды растений. Выбор концентраций токсикантов осуществляли в предварительных исследованиях таким образом, чтобы они находились в летальном диапазоне, т.е. снижали всхожесть семян *P. sativum*, поскольку имеются данные, что виды небобовых травянистых растений фитоценозов придорожных территорий более чувствительны к воздействию тяжелых металлов по сравнению представителями семейства Fabaceae (Савинов и др., 2007).

В каждом эксперименте было 4 группы для каждого из изученных видов растений: 3 опытные и 1 контрольная. В каждой группе в 5 прозрачных пластиковых контейнерах объемом 500 мл на 1 слой фильтровальной бумаги помещали 50 семян. В опытных группах в контейнеры наливали по 10 мл растворов солей тяжелых металлов – сульфата меди (0.15, 0.30 и 0.60 г/л) или нитрата свинца (0.5, 1.0 и 1.5 г/л). В контейнеры контрольных групп наливали по 10 мл дистиллированной воды. Контейнеры закрывали прозрачными крышками и помещали на стеллаж с фитолампами при температуре +20 – 22°C и продолжительности светового дня 17 ч. Каждые два дня добавляли растворы в одинаковом объеме в контейнеры опытных групп и дистиллированную воду в контроль. Через 8 суток измеряли показатели. Лабораторную всхожесть семян рассчитывали как долю проросших семян от общего количества семян в данной группе ($n = 250$). Максимальную длину корневой системы и высоту побега (длину надземной части проростка) измеряли с точностью до 1 мм ($n = 30$). Под максимальной длиной корневой системы понимали длину первичного корешка у *P. sativum* и линейный размер наиболее длинных корней у проростков *T. aestivum*. Длина надземной части и корней проростков широко используются в качестве показателей развития проростков зерновых культур (Алексейчук, 2009). Ранее нами было показано, что указанные линейные размеры проростков данного возраста в высокой степени коррелируют с сухой биомассой корневой системы и побега проростка (Егофеева, 2014).

Для оценки уровня перекисного окисления липидов (ПОЛ) побеги 3-4 растений (0.3 г) объединяли и гомогенизировали в 2 мл 3 мМ раствора трилона Б в фарфоровой ступке, замороженной в лед. В каждой группе было 10 биологических повторностей ($n = 10$; 2 биологические повторности из каждого контейнера). Интенсивность ПОЛ оценивали по содержанию ТБК-активных продуктов липопероксидации, среди которых наиболее массовым является малоновый диальдегид (МДА) (Камышников, 2002). Содержание МДА выражали в относительных единицах оптической плотности.

Статистический анализ результатов исследований проводили с помощью программ STATISTICA 10 и Биостатистика 4.03, используя однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) и критерий Стьюдента с поправкой Бонферрони для количественных признаков с нормальным распределением (интенсивность ПОЛ). В случае отклонения выборочного распределения от нормального (максимальная длина корневой системы и высота побега) использовали критерии Крускала – Уоллиса и непараметрический вариант критерия Данна для множественных парных сравнений. Для качественного признака (всхожесть семян) был использован критерий хи-квадрат (χ^2) с поправкой Бонферрони для множественных парных сравнений. На диаграммах представлены средние и их ошибки ($M \pm SE$) (интенсивность ПОЛ), либо медианы и их ошибки ($Me \pm s_{Me}$) (линейные размеры проростков) для количественных признаков, а также доли и их ошибки для всхожести семян.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение линейных размеров проростков P. sativum и T. aestivum при хроническом воздействии нитрата свинца и сульфата меди. Критерий Шапиро – Уилка показал, что в некоторых выборках распределение статистически значимо отличалось от нормального ($p < 0.05$), поэтому для анализа данных были использованы непараметрические тесты. С помощью критерия Крускала – Уоллиса было установлено влияние факторов «нитрат свинца» и «сульфат меди» на линейные размеры корневой системы *T. aestivum* (Pb (побег) – $H = 93.9$, $p = 0.001$; Pb (корневая система) – $H = 91.0$, $p = 0.001$; Cu (побег) – $H = 104.8$, $p = 0.001$; Cu (корневая система) – $H = 85.5$, $p = 0.001$). Критерий Данна, учитывающей ошибку множественных парных сравнений, показал, что сульфат меди и нитрат свинца во всех концентрациях вызывали статистически значимое ($p < 0.05$) значительное снижение максимальной длины корневой системы ($Pb - Q_{0.5/k} = 8.9$; $Q_{1.0/k} = 6.6$; $Q_{1.5/k} = 3.2$; Cu – $Q_{0.15/k} = 4.9$; $Q_{0.30/k} = 6.3$; $Q_{0.60/k} = 9.1$) и высоты побега ($Pb - Q_{0.5/k} = 3.2$; $Q_{1.0/k} = 6.8$; $Q_{1.5/k} = 9.0$; Cu – $Q_{0.15/k} = 3.4$; $Q_{0.30/k} = 6.2$; $Q_{0.60/k} = 9.9$) по сравнению с контрольным уровнем у проростков *T. aestivum* (рис. 1, 2). Особенно сильно негативный эффект проявлялся в отношении линейного размера корневой системы *T. aestivum*. В опытных группах данный показатель снижался от 69% до 25 раз по сравнению с контролем при действии нитрата свинца (рис. 1, а) и в 8 – 24 раза относительно контрольного уровня при воздействии сульфата меди (рис. 1, б). Уменьшение высоты побега у *T. aestivum* проявлялось менее сильно. Этот показатель снижался относительно контрольного уровня на 35 – 65% для сульфата меди и на 25 – 76% для нитрата свинца (см. рис. 2). Другими авторам также установлено, что рост корневой системы у растений более значительно угнетается различными тяжелыми металлами, чем ростовые процессы побега (Титов и др., 2014).

В то же время критерий Крускала – Уоллиса показал, что сульфат меди не влиял на линейные размеры корневой системы ($H = 2.1$, $p = 0.770$) и побега ($H = 7.5$, $p = 0.072$) проростков *P. sativum* (см. рис. 1, б; рис. 2, б). Нитрат свинца оказывал во всех концентрациях статистически значимый негативный эффект ($p < 0.05$) только в отношении максимальной длины корневой системы *P. sativum* ($H = 84.9$, $p = 0.001$; $Q_{0.5/k} = 4.3$; $Q_{1.0/k} = 6.7$; $Q_{1.5/k} = 8.8$). Данный показатель уменьшался 2 – 6 раз относительно контрольного уровня (см. рис. 1, а).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ *TRITICUM AESTIVUM* L.

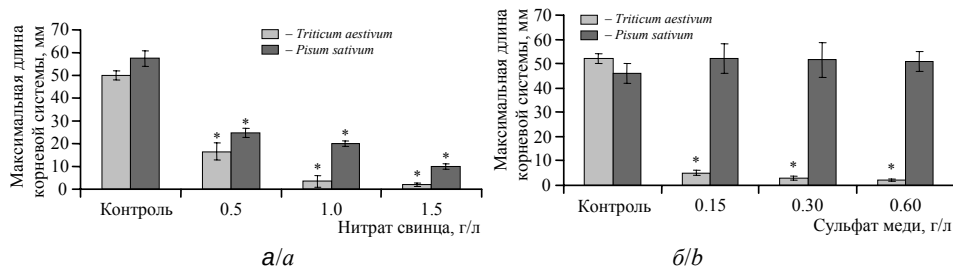


Рис. 1. Максимальная длина корневой системы проростков *T. aestivum* и *P. sativum* при хроническом воздействии различных концентраций нитрата свинца (а) и сульфата меди (б) ($Me \pm s_{Me}$, $n = 30$). * – статистически значимые различия по сравнению с данным показателем у проростков контрольной группы при $p < 0.05$

Fig. 1. Maximum length of the *T. aestivum* and *P. sativum* seedling root system under chronic exposure to various concentrations of lead nitrate (a) and copper sulfate (b) ($Me \pm s_{Me}$, $n = 30$). * – statistically significant differences compared to this indicator in seedlings of the control group when $p < 0.05$

Таким образом, ростовые процессы у *P. sativum* значительно более устойчивы к воздействию изученных солей тяжелых металлов, чем у *T. aestivum*. При этом, в отличие от меди, способность свинца нарушать ростовые процессы в корневой системе *P. sativum*, по-видимому, была связана с особенностями накопления данного элемента в органах *P. sativum*. Показано, что медь поступает из загрязненной почвы в корневую систему и побег *P. sativum* в близких количествах, а свинец аккумулируется преимущественно в корне (Троц и др., 2012), что, по-видимому, и являлось причиной ингибирующего эффекта свинца в отношении линейных размеров корневой системы.

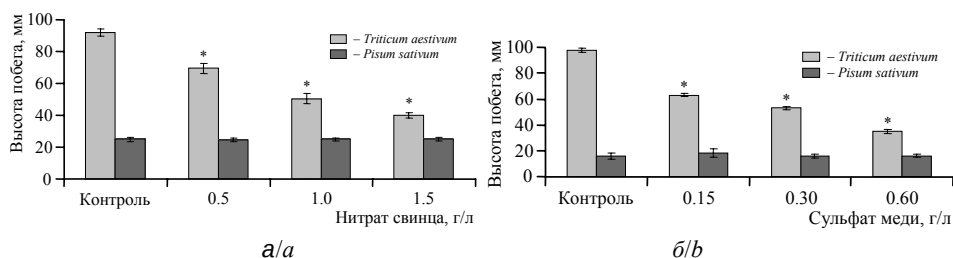


Рис. 2. Высота побега проростков *T. aestivum* и *P. sativum* при хроническом воздействии различных концентраций нитрата свинца (а) и сульфата меди (б) ($Me \pm s_{Me}$, $n = 30$). * – статистически значимые различия по сравнению с данным показателем у проростков контрольной группы при $p < 0.05$

Fig. 2. Shoot height of *T. aestivum* and *P. sativum* seedlings under chronic exposure to various concentrations of lead nitrate (a) and copper sulfate (b) ($Me \pm s_{Me}$, $n = 30$). * – statistically significant differences compared to this indicator in seedlings of the control group when $p < 0.05$

*Изменение всхожести семян *P. sativum* и *T. aestivum* при хроническом воздействии нитрата свинца и сульфата меди.* Критерий χ^2 с поправкой Бонферрони, учитывающей ошибку множественных парных сравнений, показал, что все изученные концентрации токсикантов вызвали статистически значимое снижение всхожести семян *T. aestivum* относительно контроля на 19 – 38% при воздействии нитрата свинца ($\chi^2_{0.5/\kappa} = 23.5$, $p = 0.001$; $\chi^2_{1.0/\kappa} = 11.7$, $p = 0.001$; $\chi^2_{1.5/\kappa} = 44.3$, $p = 0.001$; $df = 3$) и на 23 – 58% в случае сульфата меди ($\chi^2_{0.15/\kappa} = 28.0$, $p = 0.001$; $\chi^2_{0.30/\kappa} = 78.3$, $p = 0.001$; $\chi^2_{0.60/\kappa} = 168.4$, $p = 0.001$; $df = 3$). При возрастании концентрации поллютантов в растворе негативный эффект значительно увеличивался (рис. 3).

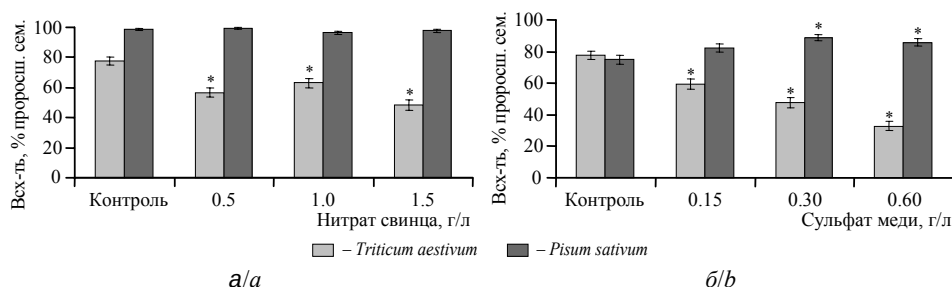


Рис. 3. Всхожесть семян *T. aestivum* и *P. sativum* при хроническом воздействии различных концентраций нитрата свинца (а) и сульфата меди (б) (доля $\pm$ ошибка доли; $n = 250$). * – статистически значимые различия по сравнению с данным показателем у контрольной группы при $p < 0.05$

Fig. 3. Germination of *T. aestivum* and *P. sativum* seeds under chronic exposure to various concentrations of lead nitrate (a) and copper sulfate (b) (proportion $\pm$ error; $n = 250$). * – statistically significant differences compared to this indicator in seedlings of the control group when $p < 0.05$

В то же время у *P. sativum* всхожесть при воздействии нитрата свинца не изменялась ($\chi^2 = 6.5$, $p = 0.117$, $df = 3$) или даже статистически значимо увеличивалась (на 14 – 19% по сравнению с контролем) при воздействии двух наибольших концентраций сульфата меди (см. рис. 3, б) ($\chi^2_{0.15/\kappa} = 2.9$, $p = 0.087$; $\chi^2_{0.30/\kappa} = 14.4$, $p = 0.001$; $\chi^2_{0.60/\kappa} = 8.6$, $p = 0.006$; $df = 3$). По-видимому, стимулирующий эффект был обусловлен тем, что, в отличие от свинца, медь относится к микроэлементам растений. Имеются данные, что предпосевная обработка семян сельскохозяйственных культур солями микроэлементов, в том числе меди, может повышать их всхожесть (Булыгин и др., 2007).

Таким образом, процесс прорастания семян у *P. sativum* является более устойчивым к воздействию сульфата меди и нитрата свинца по сравнению с *T. aestivum*.

*Изменение интенсивности липопероксидации в побеге *P. sativum* и *T. aestivum* при хроническом воздействии нитрата свинца и сульфата меди.* Критерий Шапиро – Уилка показал, что во всех выборках распределение не отличалось статистически значимо от нормального ($p > 0.05$), поэтому для анализа данных были использованы параметрические тесты. С помощью однофакторного дисперсионного анализа и парных сравнений с использованием критерия Стьюдента с поправкой

Бонферрони, учитывающей ошибку множественных парных сравнений, было установлено, что все изученные концентрации нитрата свинца ($F = 9.6$, $p = 0.001$; $t_{0.5/к} = 6.3$; $t_{1.0/к} = 5.7$; $t_{1.5/к} = 6.8$) и две наибольшие концентрации сульфата меди ($F = 8.3$, $p = 0.001$; $t_{0.15/к} = 0.6$; $t_{0.30/к} = 2.7$; $t_{0.60/к} = 4.2$) вызывали статистически значимое ($p < 0.05$) увеличение интенсивности перекисного окисления липидов в листе проростков *T. aestivum* от 22% до 2 раз по сравнению с контролем (см. рис. 4), что указывало на развитие стрессового состояния у проростков, поскольку интенсивность липопероксидации усиливается при действии любых стрессовых факторов среды на растения (Полесская, 2007; Барабой, 2006).

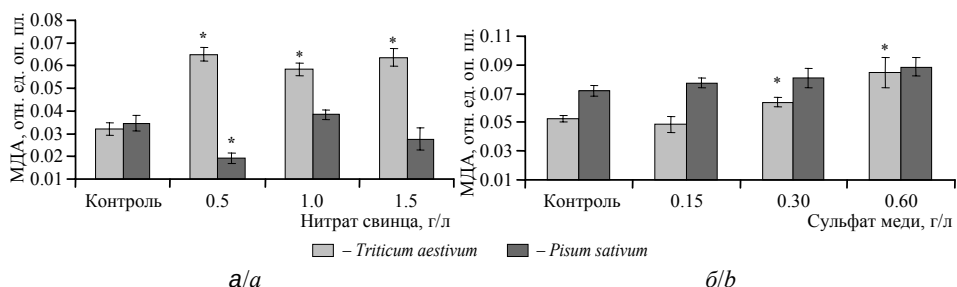


Рис. 4. Интенсивность перекисного окисления липидов в побеге *T. aestivum* и *P. sativum* при хроническом воздействии различных концентраций нитрата свинца (а) и сульфата меди (б) ($M \pm SE$; $n = 10$). * – статистически значимые различия по сравнению с данным показателем у проростков контрольной группы при $p < 0.05$

Fig. 4. Lipid peroxidation intensity in *T. aestivum* and *P. sativum* shoots under chronic exposure to various concentrations of lead nitrate (a) and copper sulfate (b) ($M \pm SE$; $n = 10$). * – statistically significant differences compared to this indicator in seedlings of the control group at $p < 0.05$

В то же время у *P. sativum* при действии всех изученных концентраций сульфата меди не отмечалось какого-либо изменения интенсивности перекисного окисления липидов у проростков относительно контроля (см. рис. 4, б) ($F = 0.68$, $p = 0.560$). Нитрат свинца не влиял на данный показатель у *P. sativum* ($t_{1.0/к} = 0.9$; $t_{1.5/к} = 1.6$; $p > 0.05$), либо даже снижал его относительно контроля (0.5 г/л – $F = 7.96$, $p = 0.001$; $t_{0.5/к} = 6.3$; $p < 0.05$) (см. рис. 4, а), что, по-видимому, связано со значительной активацией антиоксидантной системы проростков *P. sativum* (Полесская, 2007), способной сверхкомпенсировать изменение перекисного гомеостаза, вызванные поллютантами (Ерофеева, 2014, 2015). Таким образом, данные результаты указывают, что у *P. sativum* изученные концентрации сульфата меди и нитрата свинца, в отличие от *T. aestivum*, не вызывали стрессовой реакции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, у *P. sativum* прорастание семян, ростовые процессы корневой системы и пробег, а также перекисный гомеостаз являются значительно более устойчивыми к воздействию изученных концентраций нитрата свинца и сульфата

меди по сравнению с аналогичными показателями *T. aestivum*. При этом различия в устойчивости у данных видов настолько велики, что концентрации солей тяжелых металлов, находящиеся в летальном диапазоне для *T. aestivum*, не вызывали практически никаких нарушений показателей у *P. sativum*, за исключением уменьшения максимальной длины корневой системы при воздействии нитрата свинца. Возможно, основной причиной выявленной закономерности является более высокое содержание у бобовых, в том числе *P. sativum*, по сравнению со злаками, защитных пептидов фитохелатинов и металлотионеинов, способных в цитоплазме клеток образовывать с тяжелыми металлами хелаты и транспортировать тяжелые металлы в вакуоль (Серёгин, Иванов, 2001), а также белков, участвующих в развитии устойчивости к стрессовым факторам среды, например, таких как ферменты антиоксидантной системы (Полесская, 2007), белки теплового шока (БТШ) и другие. Так, показано, что у проростков гороха в стрессовых условиях наблюдается высокое содержание БТШ 90 и БТШ 70 (Kozeko, 2006). Выявленные нами закономерности устойчивости проростков *P. sativum* и *T. aestivum* к изученным тяжелым металлам вносят вклад в развитие представлений о специфике устойчивости бобовых и небобовых видов растений к загрязнению окружающей среды тяжелыми металлами, а также могут быть использованы для совершенствования методов фиторемедиации загрязненных тяжелыми металлами почв сельскохозяйственных угодий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексейчук Г. Н. Сила роста семян зерновых культур и ее оценка методом ускоренного прорастания. Минск : Право и экономика, 2009. 44 с.
- Барабой В. А. Стресс : природа, биологическая роль, механизмы, исходы. Киев : Фитосоциоцентр, 2006. 424 с.
- Булыгин С. Ю., Демшиев Л. Ф., Доронин В. А., Заришняк А. С., Пащенко Я. В., Туровский Ю. Е., Фатеев А. И., Яковенко М. М., Кордин А. И. Микроэлементы в сельском хозяйстве. Днепропетровск : Січ, 2007. 100 с.
- Водяницкий Ю. Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 872 – 881.
- Водяницкий Ю. Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М. : Почвенный институт им. В. В. Докучаева РАСХН, 2008. 164 с.
- Гелашивили Д. Б., Копосов Е. В., Лантев Л. А. Экология Нижнего Новгорода. Н. Новгород : Изд-во Нижегород. гос. архитектурно-строительного ун-та, 2007. 530 с.
- Денисов В. Н., Роголев В. А. Проблемы экологизации автомобильного транспорта. СПб. : МАНЭБ, 2005. 312 с.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М. : Мир, 1989. 440 с.
- Камышников В. С. Справочник по клинико-биохимической лабораторной диагностике. Минск : Беларусь, 2002. Т. 2. 495 с.
- Петрова Е. Е., Райхерт Е. В. Загрязнение почв вблизи автомагистралей кадмием и цинком и их биологическое поглощение яровой пшеницей (в условиях Алейского района Алтайского края) // Изв. Алт. гос. ун-та. 2013. № 3-1. С. 44 – 48.
- Полесская О. Г. Растительная клетка и активные формы кислорода. М. : Кн. дом «Университет», 2007. 140 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ *TRITICUM AESTIVUM* L.

Пухальский Я. В., Вишнякова М. А., Лоскутов С. И., Семенова Е. В., Сексте Э. А., Шапошников А. И., Сафронова В. И., Белимов А. А., Тихонович И. А. Сорта гороха посевного (*Pisum sativum* L.) с низкой аккумуляцией тяжелых металлов из загрязненной почвы // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52, № 3. С. 597 – 606.

Савинов А. Б., Курганова Л. Н., Шекунов Ю. И. Интенсивность перекисного окисления липидов у *Taraxacum officinale* Wigg. и *Vicia cracca* L. в биотопах с разным уровнем загрязнения почв тяжелыми металлами // Экология. 2007. № 3. С. 191 – 197.

Серёгин И. В., Иванов В. Г. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48, № 4. С. 606 – 630.

Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М. Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам. Петрозаводск : Карельский науч. центр РАН, 2011. 77 с.

Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланова В. В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск : Карельский науч. центр РАН, 2014. 194 с.

Троц Н. М., Троц В. Б., Обущенко С. В. Аккумуляция тяжелых металлов зерновыми бобовыми культурами в агроландшафтах Самарского Заволжья // Достижения науки и техники АПК. 2012. № 2. С. 50 – 51.

Belimov A. A., Malkov N. V., Puhalsky J. V., Tsyganov V. E., Bodyagina K. B., Safronova V. I., Dietz K.-J., Tikhonovich I. A. The Crucial Role of Roots in Increased Cadmium-tolerance and Cd-accumulation in the Pea Mutant SGECDt // *Biologia Plantarum*. 2018. Vol. 62, № 3. P. 543 – 550.

Erofeeva E. A. Developmental Stability of a Leaf of *Pisum sativum* L. Under the Influence of Formaldehyde in a Wide Range of Doses // *Russ. J. of Developmental Biology*. 2012. Vol. 42, № 5. P. 259 – 263.

Erofeeva E. A. Hormesis and Paradoxical Effects of Wheat Seedling (*Triticum aestivum* L.) Parameters Upon Exposure to Different Pollutants in a Wide Range of Doses // *Dose Response*. 2014. Vol. 12, № 1. P. 121 – 135.

Erofeeva E. A. Dependence of Guaiacol Peroxidase Activity and Lipid Peroxidation Rate in Drooping Birch (*Betula pendula* Roth) and Tillet (*Tilia cordata* Mill.) Leaf on Motor Traffic Pollution Intensity // *Dose Response*. 2015. Vol. 13, № 2. P. 1 – 6.

Erofeeva E. A. Hormesis and Paradoxical Effects of Pea (*Pisum sativum* L.) Parameters Upon Exposure to Formaldehyde in a Wide Range of Doses // *Ecotoxicology*. 2018. Vol. 27. P. 569 – 577.

Fagorzi C., Checucci A., DiCenzo G. C., Debiec-Andrzejewska K., Dziewit L., Pini F., Mengoni A. Harnessing *Rhizobia* to Improve Heavy-Metal Phytoremediation by Legumes // *Genes*. 2018. Vol. 9, iss. 11. P. 1 – 16.

Kozeko L. Ye. Alterations in a Soluble Protein Pattern and a Quantity of Stress Proteins HSP90 and HSP70 in Pea Seedlings in Response to Clinorotation // *Biopolymers and Cell*. 2006. Vol. 22, № 2. P. 136 – 142.

Micó C., Peris M., Sánchez J., Recatalá L. Heavy Metal Content of Agricultural Soils in a Mediterranean Semiarid Area : The Segura River Valley (Alicante, Spain) // *Spanish J. of Agricultural Research*. 2006. Vol. 4, № 4. P. 363 – 372.

Su C., Jiang L. Q., Zhang W. J. A Review on Heavy Metal Contamination in the Soil Worldwide : Situation, Impact and Remediation Techniques // *Environmental Skeptics and Critics*. 2014. Vol. 3, № 2. P. 24 – 38.

Xu Y., Liang X., Xu Y., Qin X., Huang Q., Wang L., Sun Y. Remediation of Heavy Metal-Polluted Agricultural Soils Using Clay Minerals // *Pedosphere*. 2017. Vol. 27, № 2. P. 193 – 204.

Yruela I. Copper in Plants // *Brazilian J. of Plant Physiology*. 2005. Vol. 17, № 1. P. 145 – 156.

Е. А. Ерофеева

**Comparative Analysis of *Triticum aestivum* L. (Poaceae, Poales)
and *Pisum sativum* L. (Fabaceae, Fabales) Resistance to Heavy Metals**

Elena A. Erofeeva, <https://orcid.org/0000-0002-1187-8316>; ele77785674@yandex.ru

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod
23 Gagarin Avenue, Nizhni Novgorod 603950, Russia

Received 22 April 2019, revised 11 November 2019, accepted 14 December 2019

Erofeeva E. A. Comparative Analysis of *Triticum aestivum* L. (Poaceae, Poales) and *Pisum sativum* L. (Fabaceae, Fabales) Resistance to Heavy Metals. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2020, no. 2, pp. 165–176 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2020-2-165-176>

Heavy metals are most common soil pollutants, including agricultural land. At the same time, the level of heavy metal pollution can significantly exceed the standards. Pea (*Pisum sativum* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) are most important crops. At the same time, no comparative analysis of their resistance to high concentrations of heavy metals has been carried out. In connection with this, the resistance of *T. aestivum* and *P. sativum* seedlings to the chronic effects of lead and copper salts in the range of lethal concentrations for *T. aestivum* was comparatively evaluated (0.15, 0.30 and 0.60 g/L of copper sulfate; 0.5, 1.0 and 1.5 g/L of lead nitrate) in experimental conditions. All studied concentrations of the toxicants caused a decrease in seed germination of *T. aestivum* relative to the control by 19–38% and 23–58% when exposed to lead nitrate and copper sulphate, respectively, which indicated the manifestation of lethal effects. All studied concentrations of both toxicants caused a significant reduction in the root system length (from 69% to 25 times) and shoot height (by 25–76%) as compared with the control level in *T. aestivum* seedlings, and also led to an increase in the intensity of lipid peroxidation in seedling shoots, indicating the development of a stress reaction. At the same time, the studied concentrations of heavy metal salts, which were lethal for *T. aestivum*, did not cause almost any disturbances of the studied parameters in *P. sativum*, except for a decrease in the root system length after lead nitrate exposure. Thus, seed germination, growth processes of the root system and shoot, as well as peroxide homeostasis in *P. sativum* seedlings were much more resistant to the studied concentrations of lead nitrate and copper sulfate as compared with these parameters of *T. aestivum*.

Keywords: *Triticum aestivum*, *Pisum sativum*, lead, copper, linear dimensions of seedlings, seed germination, lipid peroxidation.

DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2020-2-165-176>

REFERENCES

- Alekseichuk G. N. *Seed Vigor of Cereal Crops and Its Evaluation With Accelerated Aging Method*. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2009. 44 p. (in Russian).
Baraboy V. A. *Stress: priroda, biologicheskaya rol', mekhanizmy, iskhody* [Stress: Nature, Biological Role, Mechanisms, Outcomes]. Kiev, Phytosociocenter Publ., 2006. 424 p. (in Russian).

Buligin S. Y., Demishev L. F., Doronin V. A., Zapishnyak A. S., Paschenko Y. V., Turovskiy Y. Y., Fateev A. I., Yakovenko M. M., Kordin A. I. *Mikroelementi v selskom hozyaystve* [Trace Elements in Agriculture]. Dnepropetrovsk, Sich Publ., 2007. 100 p. (in Russian).

Vodyanitskii Y. N. Contamination of Soils With Heavy Metals and Metalloids and Its Ecological Hazard (Analytic Review). *Eurasian Soil Science*, 2013, vol. 46, no. 7, pp. 793–801.

Vodyanitskiy Y. N. *Tiazhelye metally i metalloidy v pochvakh* [Heavy Metals and Metalloids in Soils]. Moscow, Pochvennyi institut im. V. V. Dokuchaeva RASKhN Publ., 2008. 164 p. (in Russian).

Gelashvili D. B., Koposov E. V., Laplev L. A. *Ekologiya Nizhnego Novgoroda* [Ecology of Nizhni Novgorod]. Nizhni Novgorod, Izdatel'stvo Nizhegorodskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta, 2007. 530 p. (in Russian).

Denisov V. N., Rogalev V. A. *Problemy ekologizatsii avtomobil'nogo transporta* [Problems of Road Transport Ecologization]. Saint Petersburg, MANEB Publ., 2005. 312 p. (in Russian).

Kabata-Pendias A., Pendias H. *Trace Elements in Soils and Plants*. Moscow, Mir Publ., 1989. 440 p. (in Russian).

Kamyshnikov V. S. *Spravochnik po kliniko-biokhimicheskoi laboratornoi diagnostike* [Reference Book on Clinical and Biochemical Laboratory Diagnostics]. Minsk, Belarus' Publ., 2002, vol. 2. 495 p. (in Russian).

Petrova E. E., Reikher E. V. Effect of Vehicles on the Accumulation of Lead and Zinc in Soils and their Biological Absorption by Soft Wheat (*Triticum aestivum*) in Roadside Agricultural Lands (in the Alei Zone, Altai Territory). *Izvestiya of Altai State University*, 2013, no. 3-1, pp. 44–48 (in Russian).

Polesskaya O. G. *Rastitel'naya kletka i aktivnye formy kisloroda* [Plant Cell and Active Oxygen Species]. Moscow, Knizhnyi dom "Universitet" Publ., 2007. 140 p. (in Russian).

Pukhalsky Ya. V., Vishniyakova M. A., Loskutov S. I., Semenova E. V., Sekste E. A., Shaposhnikov A. I., Safronova V. I., Belimov A. A., Tikhonovich I. A. Pea (*Pisum sativum* L.) Cultivars with Low Accumulation of Heavy Metals from Contaminated Soil. *Agricultural Biology*, 2017, vol. 52, no. 3, pp. 597–606 (in Russian).

Savinov A. B., Kurganova L. N., Shekunov Yu. I. Intensity of Lipid Peroxidation in *Taraxacum officinale* Wigg. and *Vicia cracca* L. in Biotopes with Different Levels of Heavy Metals Pollution in Soil. *Russian J. Ecology*, 2007, vol. 38, no. 3, pp. 174–180.

Seregin I. V., Ivanov V. G. Physiological Aspects of Cadmium and Lead Toxic Effects in Higher Plants. *Russian J. Plant Physiology*, 2001, vol. 48, no. 4, pp. 523–544.

Titov A. F., Talanova V. V., Kaznina N. M. *Fiziologicheskie osnovy ustoichivosti rastenii k tiazhelym metallam* [Physiological Bases of Plant Resistance to Heavy Metals]. Petrozavodsk, Karelskii nauchnyi tsentr RAN Publ., 2011. 77 p. (in Russian).

Titov A. F., Kaznina N. M., Talanova V. V. *Tiazhelye metally i rasteniia* [Heavy Metals and Plants]. Petrozavodsk, Karelskii nauchnyi tsentr RAN Publ., 2014. 194 p. (in Russian).

Trots N. M., Trots V. B., Obuschenko S. V. Accumulation of Heavy Metals Grain Legumes in Agricultural Landscapes Volga Samara. *Achievements of Science and Technology of AIC*, 2012, no. 2, pp. 50–51 (in Russian).

Belimov A. A., Malkov N. V., Puhalsky J. V., Tsyganov V. E., Bodyagina K. B., Safronova V. I., Dietz K. -J., Tikhonovich I. A. The Crucial Role of Roots in Increased Cadmium-tolerance and Cd-accumulation in the Pea Mutant SGECDt. *Biologia Plantarum*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 543–550.

Erofeeva E. A. Developmental Stability of a Leaf of *Pisum sativum* L. Under the Influence of Formaldehyde in a Wide Range of Doses. *Russian J. of Developmental Biology*, 2012, vol. 42, no. 5, pp. 259–263.

Erofeeva E. A. Hormesis and Paradoxical Effects of Wheat Seedling (*Triticum aestivum* L.) Parameters Upon Exposure to Different Pollutants in a Wide Range of Doses. *Dose Response*, 2014, vol. 12, no. 1, pp. 121–135.

Erofeeva E. A. Dependence of Guaiacol Peroxidase Activity and Lipid Peroxidation Rate in Drooping Birch (*Betula pendula* Roth) and Tillet (*Tilia cordata* Mill.) Leaf on Motor Traffic Pollution Intensity. *Dose Response*, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 1–6.

Erofeeva E. A. Hormesis and Paradoxical Effects of Pea (*Pisum sativum* L.) Parameters Upon Exposure to Formaldehyde in a Wide Range of Doses. *Ecotoxicology*, 2018, vol. 27, pp. 569–577.

Fagorzi C., Checcucci A., DiCenzo G. C., Debiec-Andrzejewska K., Dziewit L., Pini F., Mengoni A. Harnessing *Rhizobia* to Improve Heavy-Metal Phytoremediation by Legumes. *Genes*, 2018, vol. 9, iss. 11, pp. 1–16.

Kozeko L. Ye. Alterations in a Soluble Protein Pattern and a Quantity of Stress Proteins HSP90 and HSP70 in Pea Seedlings in Response to Clinorotation. *Biopolymers and Cell*, 2006, vol. 22, no. 2, pp. 136–142.

Micó C., Peris M., Sánchez J., Recatalá L. Heavy Metal Content of Agricultural Soils in a Mediterranean Semiarid Area : The Segura River Valley (Alicante, Spain). *Spanish J. of Agricultural Research*, 2006, vol. 4, no. 4, pp. 363–372.

Su C., Jiang L. Q., Zhang W. J. A Review on Heavy Metal Contamination in the Soil Worldwide : Situation, Impact and Remediation Techniques. *Environmental Skeptics and Critics*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 24–38.

Xu Y., Liang X., Xu Y., Qin X., Huang Q., Wang L., Sun Y. Remediation of Heavy Metal-Polluted Agricultural Soils Using Clay Minerals. *Pedosphere*, 2017, vol. 27, no. 2, pp. 193–204.

Yruela I. Copper in Plants. *Brazilian J. of Plant Physiology*, 2005, vol. 17, no. 1, pp. 145–156.