



Толерантность малины красной к пестицидам и ионам никеля

✉ Соловых Н.В.¹, Будаговский А.В.^{1,2}, Будаговская О.Н.^{1,2}

¹Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина

Мичуринск, Россия

²Мичуринский государственный аграрный университет

Мичуринск, Россия

✉ e-mail: natalyasolovykh@yandex.ru

Представлены результаты исследования толерантности к ионам никеля растений малины красной (*Rubus idaeus* L.), отобранных на устойчивость к пестицидам (глифосату, беномилу и малатиону). Микрочеренки малины культивировали на питательной среде, содержащей 0,25 мМ хлорида никеля. С использованием хлорофиллфлуориметра LPT-3 (Россия) регистрировали удельную фотосинтетическую активность тканей (Kf). Сравнивали уровень падения Kf под влиянием соли тяжелого металла на контрольной и содержащей антиоксиданты средах. Регистрировали также влияние ионов никеля на изменение Kf и скорость некротизации листьев у контрольных и пестицидотолерантных растений. Хлорид никеля на 10-е сутки культивирования снижал фотосинтетическую активность тканей от 0,531 до 0,12. Внесение в среду аскорбиновой кислоты уменьшало негативное действие токсичного вещества на 37,84% (Kf = 0,26), внесение глутатиона восстановленного – на 77,80% (Kf = 0,44). Это свидетельствует о роли антиоксидантов в реализации толерантности растений к тяжелым металлам. Установлены различия между контрольными и устойчивыми к пестицидам растениями по изменению Kf и скорости некротизации листьев при стрессовом воздействии. В присутствии токсичного вещества у контрольных растений на 10-е сутки культивирования снижение Kf составило 51,74% (от 0,172 до 0,083), у пестицидотолерантных растений – 32,20% (от 0,172 до 0,117). На среде, содержащей соль тяжелого металла, у контрольных растений *in vitro* на 30-е сутки культивирования зарегистрирована некротизация 51,33% листьев, у пестицидустойчивых – 35,65%. Это свидетельствует о более высокой толерантности к хлориду никеля устойчивых к пестицидам растений по сравнению с контрольными.

Ключевые слова: малина красная, *in vitro*, тканевая селекция, удельная фотосинтетическая активность, хлорид никеля, пестициды, толерантность

Tolerance of red raspberry to pesticides and nickel ions

✉ Solovykh N.V.¹, Budagovsky A.V.^{1,2}, Budagovskaya O.N.^{1,2}

¹I.V. Michurin Federal Scientific Center

Michurinsk, Russia

²Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

✉ e-mail: natalyasolovykh@yandex.ru

The results of a study of nickel tolerance in red raspberry (*Rubus idaeus* L.) plants selected for resistance to pesticides (glyphosate, benomyl and malathion) are presented. Raspberry micro cuttings were cultivated on a nutrient medium containing 0.25 mM nickel chloride. Using a chlorophyll fluoro-

meter LPT-3 (Russia), the specific photosynthetic activity of tissues (Kf) was recorded. The level of Kf drop under the influence of heavy metal (HM) salt on the control medium and the medium containing antioxidants was compared. The effect of nickel ions on the change of Kf and the rate of leaf necrotization in control and pesticide-tolerant plants was also recorded. Nickel chloride reduced the Kf of the tissues from 0.531 to 0.12 on the tenth day of cultivation. Adding ascorbic acid to the medium reduced the negative effect of the toxic substance by 37.84% (Kf=0.26), and adding reduced glutathione reduced it by 77.80% (Kf=0.44). This indicates the role of antioxidants in the implementation of plant tolerance to heavy metals. Differences were established between control and pesticide-resistant plants in terms of the magnitude of Kf change and the rate of leaf necrotization under stress. In the presence of a toxic substance, the Kf of control plants decreased by 51.74% (from 0.172 to 0.083) on the tenth day of cultivation, while that of the pesticide-tolerant plants decreased by 32.20% (from 0.172 to 0.117). On a medium containing heavy metal salt, 51.33% of the leaves of control plants *in vitro* were necrotized on the thirtieth day of cultivation, while 35.65% of the leaves of pesticide-resistant plants were necrotized. This indicates that pesticide-resistant plants are more tolerant to nickel chloride than control plants.

Keywords: red raspberry, *in vitro*, tissue selection, specific photosynthetic activity, nickel chloride, pesticides, tolerance

Для цитирования: Соловых Н.В., Будаговский А.В., Будаговская О.Н. Толерантность малины красной к пестицидам и ионам никеля // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2026. Т. 56. № 4. С. 33–41. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2026-4-4>

For citation: Solovykh N.V., Budagovsky A.V., Budagovskaya O.N. Tolerance of red raspberry to pesticides and nickel ions. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* = *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2026, vol. 56, no. 4, pp. 33–41. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2026-4-4>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Продуктивность сельскохозяйственных растений существенно снижают негативные абиотические воздействия окружающей среды. Наиболее вредоносны из них экстремальные температуры, недостаточное или избыточное увлажнение, высокая засоленность почв, загрязнение их соединениями тяжелых металлов (ТМ), высокая пестицидная нагрузка. Данные воздействия нарушают нормальное прохождение физиологических процессов в растительных тканях, что приводит к снижению интенсивности фотосинтеза, замедлению роста растений и уменьшению их урожайности [1].

Проблема может быть решена выведением толерантных сортов¹ [1]. Однако селекция на устойчивость к каждому из стрессоров – длительный и трудоемкий процесс.

Абиотические стрессоры помимо специфических имеют общие механизмы действия. Они нарушают баланс между производством активных форм кислорода (АФК) и его детоксикацией антиоксидантной системой, что приводит к накоплению АФК. Супероксидный анион – радикал ($O_2^{\cdot-}$), перекись водорода (H_2O_2), гидроксильный радикал ($\cdot OH$), синглетный кислород (1O_2), гипогалоиды ($HOCl$, $NOCl$, $HOBr$, HOI , $HOSCN$), оксид азота ($NO^{\cdot}$) и другие радикалы выполняют роль сигнальных молекул, но их избыток активизирует окислительные процессы, вызывающие изменение структуры липидов, белков и нуклеопротеидов. Степень нарушения зависит от интенсивности воздействий и их продолжительности [2].

Окислительный стресс у растений может быть вызван экстремальными температура-

¹Драгавцев В.А., Драгавцева И.А., Ефимова И.Л., Моренец А.С., Савин И.Ю. Управление взаимодействием «генотип – среда» – важнейший рычаг повышения урожаев сельскохозяйственных растений // Труды Кубанского государственного университета. 2016. Т. 59. № 2. С. 105–121.

ми, засухой [2, 3], пестицидами [4], избыточным засолением почв [5], ионами тяжелых металлов² [6] и др. В связи с этим отбор растений, способных к значительной активизации антиоксидантной системы при негативных воздействиях, может расширить потенциал адаптации к стрессорам.

Ускорить процесс выведения толерантных сортов позволяет метод клеточной или тканевой селекции, заключающийся в отборе на селективном фоне *in vitro* устойчивых клеток или тканей с последующей регенерацией из них растений. Есть сведения об успешном применении метода клеточной селекции для получения растений с повышенной устойчивостью к ионам свинца [7] и меди. Методом измерения интенсивности перекисного окисления липидов в присутствии ТМ доказано, что толерантность к ионам меди связана с активностью антиоксидантной системы растений. Отобранные на толерантность к параквату (пестицид, вызывающий образование АФК) клеточные линии льна многолетнего также проявили повышенную устойчивость к ионам меди [8].

С учетом роли антиоксидантной системы в реализации толерантности разработаны методы определения устойчивости растений к тяжелым металлам на основании регистрации активности ферментов антиоксидантной системы и интенсивности перекисного окисления липидов (ПОЛ) в присутствии ТМ [9].

В тканях растений равновесие между выработкой и инаktivацией АФК поддерживают ферментативные и неферментативные механизмы антиоксидантной защиты. Основными ферментативными антиоксидантами являются аскорбатпероксидаза, супероксиддисмутаза, каталаза, глутатионредуктаза. К основным неферментативным антиоксидантам относятся жирорастворимые (α -токоферол и β -каротин), а также водорастворимые (глутатион, аскорбиновая кислота и др.) антиоксиданты [10].

В Федеральном научном центре им. И.В. Мичурина изучено влияние глутати-

она восстановленного (GSH) и аскорбиновой кислоты (AsA) на рост и размножение *in vitro* растений малины красной в присутствии хлорида натрия и пестицидов в токсичных концентрациях. Показано снижение негативного действия названных токсичных веществ на коэффициент размножения и среднюю длину микропобегов в присутствии антиоксидантов, что подтверждает роль последних в реализации толерантности к засолению и пестицидам. В процессе исследований оптимизированы методы диагностики *in vitro* устойчивости растений к стрессовым воздействиям по изменению морфометрических показателей и скорости изменения показателей флуоресценции в присутствии стрессоров [11].

В 2017–2024 гг. в ФНИЦ им. И.В. Мичурина проводили разработку селективных систем для получения устойчивых к избыточному хлоридному засолению и пестицидам растений рода *Rubus*. Методом тканевой селекции получены растения ежевики с повышенной толерантностью к глифосату и хлоридному засолению [11], а также устойчивые к беномилу, малатиону, глифосату и хлоридному засолению растения малины красной.

Цель исследования – доказать роль антиоксидантной системы в реализации толерантности растений малины красной к хлориду никеля.

Задачи исследования:

- изучить действие тяжелых металлов на физиологическое состояние растительных тканей на контрольных средах (без антиоксидантов) и средах, содержащих аскорбиновую кислоту или глутатион восстановленный;
- провести сравнение устойчивости к ионам хлорида никеля контрольных и резистентных к пестицидам растений малины для доказательства возможности получения сортов, обладающих повышенной толерантностью к различным абиотическим стрессорам.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве материала исследования использованы контрольные и толерантные к некоторым пестицидам растения малины крас-

²Mohnish P., Kumar N. Effect of Heavy Metals on Plants: An Overview // International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management. 2016. Vol. 5. Iss. 3. P. 56–66. DOI: 10.13140/RG.2.2.27583.87.204.

ной (*Rubus idaeus* L.) сорта Оранжевое чудо, культивируемые *in vitro*. Устойчивые растения получены методом тканевой селекции. Первоначально отобраны растения с повышенной толерантностью к фунгициду беномилу из группы бензилимидазолов и одновременно инсектициду малатиону из группы фосфорорганических веществ (ФОВ). Затем доказана более высокая устойчивость отобранных растений также к гербициду глифосату (N-(фосфонометил)-глицину) из группы ФОВ.

Микрочеренки культивировали на среде MS, содержащей 0,5 мг/л 6-бензиламинопурина (6-БАП), 0,1 мг/л β-индолил-3-масляной кислоты (ИМК) и 0,5 мг/л гибберелловой кислоты (ГК). Культуральные сосуды содержали при освещенности 2500 лк, длине светового дня 16 ч и температуре 23 ± 2 °C.

Для диагностики толерантности растений к тяжелым металлам в питательную среду вносили 0,25 мМ хлорида никеля шестиводного ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Толерантность растений оценивали по проценту некротизированных листьев через 15, 30, 45 и 60 сут с момента закладки опыта. Сравнивали скорость изменения названного показателя у контрольных и устойчивых к пестициду растений на среде с тяжелыми металлами. В каждом варианте опыта использовали пять биологических повторностей по шесть микрочеренков в каждой.

Для определения действия тяжелых металлов на показатели флуоресценции хлорофилла в тканях контрольных и отобранных на устойчивость к пестицидам растений регистрировали удельную фотосинтетическую активность (Kf) с использованием хлорофиллфлуориметра LPT-3C (Россия), позволяющего осуществлять измерения, не нарушая стерильности *in vitro*. Измерения проводили через 10 сут после высадки микрочеренков на среды. Перед измерениями растения выдерживали в темноте в течение часа.

С целью изучения действия экзогенных антиоксидантов на интенсивность повреждающего действия тяжелых металлов на растения в питательные среды, содержащие токсичное вещество, вносили аскорбиновую кислоту

($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) в концентрации 0,75 мМ или глутатион восстановленный (γ-глутамил-цистеинилглицин, $\text{C}_{10}\text{H}_{17}\text{N}_3\text{O}_6\text{S}$) в концентрации 0,5 мМ (концентрации подобраны экспериментально). Контролем служила среда без антиоксидантов. Через 10 сут культивирования измеряли Kf. Сравнивали снижение удельной фотосинтетической активности под действием ионов никеля по сравнению с этим показателем на среде без тяжелых металлов в присутствии антиоксидантов и без них.

Обработка данных включала подсчет средних значений, их ошибки и существенности различий между средними в вариантах опыта. Проведена с использованием статистического пакета Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучено влияние хлорида никеля на физиологическое состояние тканей контрольных (не прошедших ранее отбор на устойчивость к каким-либо абиотическим стрессорам) растений малины. Установлено, что данный токсичный препарат снижал удельную фотосинтетическую активность во всех вариантах опыта. Внесение в питательную среду антиоксидантов уменьшало негативное действие тяжелых металлов. На среде, содержащей 0,25 мМ хлорида никеля, на 10-е сутки культивирования Kf снизилась в отсутствие антиоксидантов на 77,22%. В присутствии аскорбиновой кислоты она уменьшилась лишь на 48,90%, в присутствии глутатиона восстановленного – на 17,14% (см. рис. 1). Различия между вариантами статистически существенны ($p \leq 0,05$).

Объяснением снижения негативного воздействия тяжелых металлов при внесении в питательную среду экзогенных антиоксидантов может служить способность их обезвреживать АФК. Аскорбиновая кислота восстанавливает супероксидный радикал, перекись водорода, регенерирует токоферол из токофероксильного радикала. В свою очередь, токоферолы гасят различные АФК, предотвращают окисление липидов, стабилизируют мембраны [12]. Глутатион восстановленный утилизирует ряд кислородных радикалов и

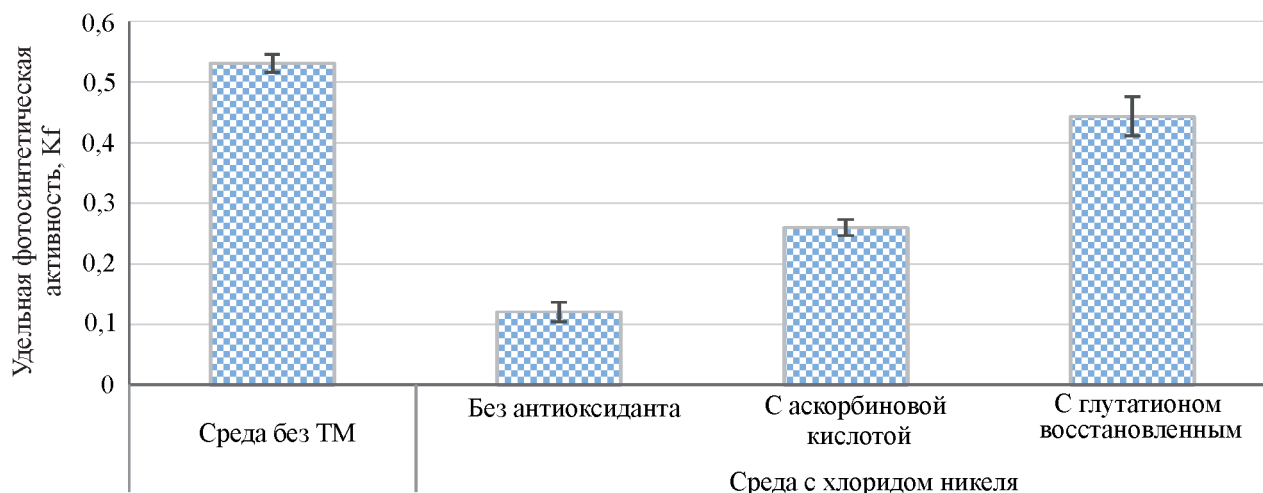


Рис. 1. Снижение удельной фотосинтетической активности в тканях малины красной *in vitro* под действием хлорида никеля на контрольной среде и средах, содержащих антиоксиданты

Fig. 1. Reduction of specific photosynthetic activity in raspberry tissues *in vitro* under the influence of nickel chloride on control medium and medium containing antioxidants

регенерирует аскорбиновую кислоту [13]. В природе неблагоприятные воздействия приводят к повышению концентрации названных антиоксидантов в клетках растений [12, 13].

Толерантность к абиотическим стрессорам имеет прямую связь с эффективностью работы антиоксидантной системы, поэтому представляет интерес изучение устойчивости к другим негативным воздействиям (например, к ТМ) толерантных к пестицидам растений.

На среде без тяжелых металлов между контрольными и устойчивыми к пестицидам растениями не зарегистрировано существенных различий по величине удельной фотосинтетической активности. Внесение в среду для культивирования 0,25 мМ хлорида никеля вызвало статистически существенное ($p \leq 0,05$) снижение удельной фотосинтетической активности тканей во всех вариантах опыта. Однако у контрольных растений снижение Kf по сравнению с этим показателем

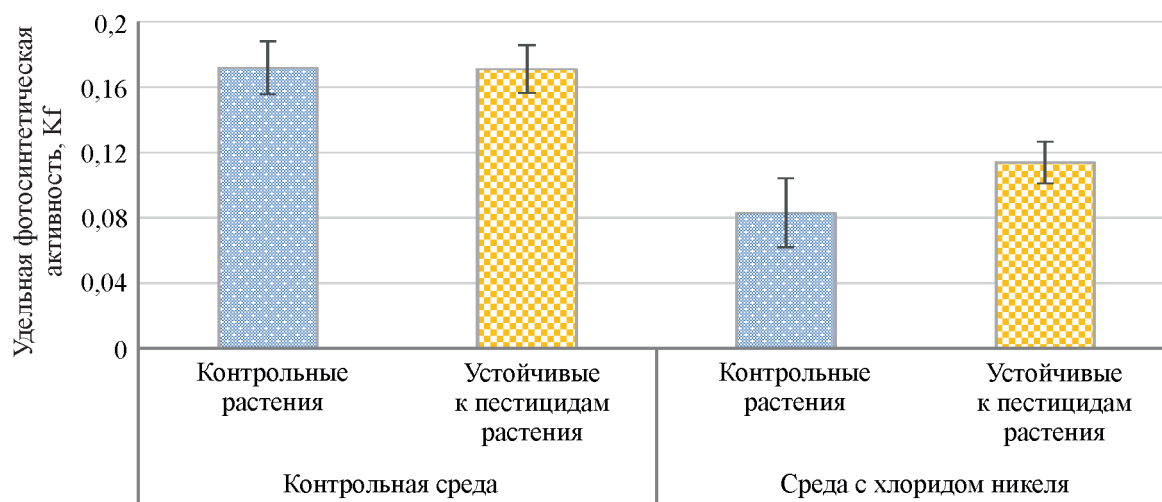


Рис. 2. Снижение удельной фотосинтетической активности тканей контрольных и устойчивых к пестицидам растений малины *in vitro* под действием ТМ

Fig. 2. Reduction of the specific photosynthetic activity of the tissues of control and pesticide-resistant raspberry plants *in vitro* under the influence of HM

на среде без соли никеля составило 55,97%, у пестицидотолерантных растений – 33,42% (см. рис. 2). Различия по данному показателю на среде с ионами никеля между контрольными и устойчивыми к пестицидам растениями статистически существенны ($p \leq 0,05$).

Полученные результаты свидетельствуют о более высокой толерантности к соли никеля растений, отобранных на резистентность к пестицидам.

Диагностика толерантности к соли никеля методом учета скорости некротизации листьев также подтвердила более высокую устойчивость к тяжелым металлам резистентных к пестицидам растений по сравнению с контрольными. На среде без хлорида никеля некротизация листьев практически отсутствовала. Она не превышала 4–5% на протяжении всего культивирования. Существенных различий между контрольными и устойчивыми к пестицидам растениями по данному показателю в отсутствии стрессора не зарегистрировано.

Наличие в питательной среде соли тяжелого металла вызывает некротизацию листьев. У пестицидустойчивых растений по сравнению с контрольными этот процесс происходит медленнее. Через 15 сут культивирования процент погибших листьев у контрольных растений оказался в 4,8 раза выше, чем у отобранных на резистентность к пести-

цидам. Через 30–60 сут количество некротизированных листьев у контрольных растений на 38,01–51,28% превышало этот показатель у пестицидотолерантных форм (см. рис. 3).

Различия между контрольными и устойчивыми к пестицидам растениями по указанному показателю через 15, 30, 45 и 60 сут культивирования статистически существенны ($p \leq 0,05$). У контрольных растений в присутствии хлорида никеля листья полностью погибали через 70 сут, у пестицидустойчивых – через 85 сут.

Более медленная некротизация листьев устойчивых к пестицидам растений по сравнению с контрольными свидетельствует о их более высокой толерантности к ионам никеля. Это согласуется с данными диагностики толерантности к тяжелым металлам контрольных и пестицидрезистентных форм по изменению удельной фотосинтетической активности тканей.

Помимо общих для различных стрессоров повреждающих механизмов, связанных с накоплением АФК, существует ряд специфических. В связи с этим кроме антиоксидантной системы существуют иные механизмы защиты. Например, ионы тяжелых металлов, связываются еще до поступления в клетку во внеклеточном матриксе или клеточными стенками. Растения могут выделять металлхелатирующие лиганды или железозамещающие лиганды.

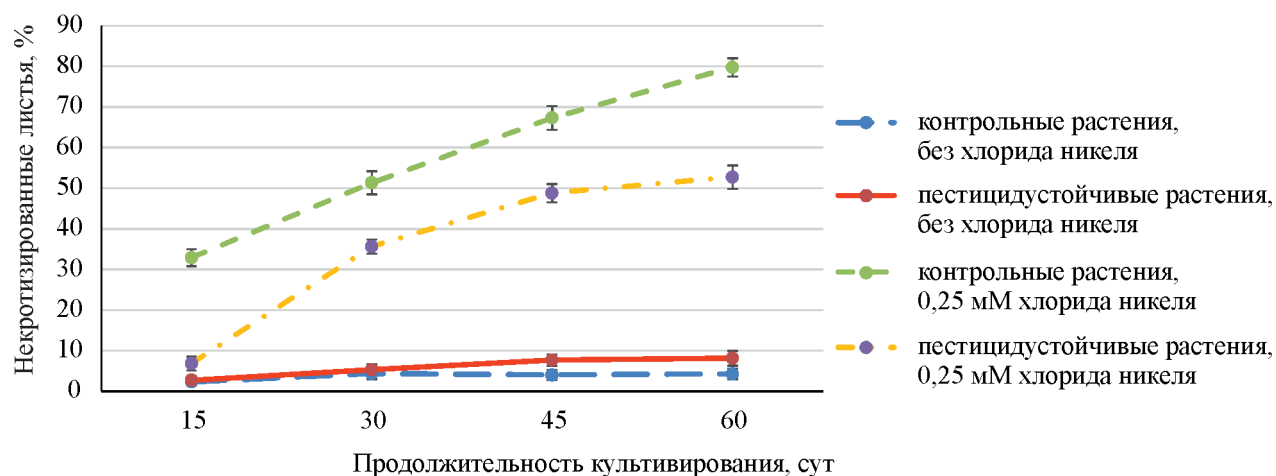


Рис. 3. Некротизация листьев контрольных и устойчивых к пестицидам растений малины красной под действием хлорида никеля *in vitro*

Fig. 3. Necrotization of the leaves of control and pesticide-resistant raspberry plants under the influence of nickel chloride *in vitro*

содержащие белки, связывающие ионы ТМ³. Устойчивость к пестицидам может быть реализована снижением проницаемости кутикулы, ускорением деградации пестицидов в тканях и их выведения из них.

В связи с этим отбор форм сельскохозяйственных культур с высокой эффективностью антиоксидантной системы не может дать сортов с максимально высокой толерантностью ко всем абиотическим стрессорам. Однако относительное повышение и расширение потенциала адаптации сортов к негативным воздействиям может сделать более устойчивым садоводство при постоянно нарастающей нестабильности условий окружающей среды.

ВЫВОДЫ

1. В тканях малины красной *in vitro* диагностировано снижение удельной фотосинтетической активности в присутствии токсичной концентрации хлорида никеля (0,25 мМ). Внесение в питательную среду глутатиона восстановленного или аскорбиновой кислоты снижало негативное действие соли тяжелых металлов на 37,84–77,80%, что свидетельствует о роли антиоксидантной системы растений в реализации толерантности к токсичному веществу.

2. Устойчивые к пестицидам растения малины красной продемонстрировали более высокую толерантность к ионам никеля. Это подтверждается более низкой скоростью некротизации листьев и меньшим снижением удельной фотосинтетической активности *in vitro* в присутствии соли тяжелого металла у пестицидустойчивых растений по сравнению с контрольными.

3. Более высокая устойчивость к хлориду никеля полученных методом тканевой селекции пестицидотолерантных растений подтверждает возможность селекции на комплексную устойчивость к абиотическим стрессорам путем отбора форм, способных эффективно активизировать деятельность антиоксидантной системы при негативных влияниях окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путьина О.В., Беседин А.Г. Абиотические стресс-факторы и их влияние на накопление ассимилятов растениями и урожайность овощного гороха // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019. Т. 180. № 2. С. 51–59. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-2-51-59.
2. Mishra N., Jiang C., Chen L., Paul A., Chatterjee A., Shen G. Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. *Frontiers in Plant Science*. 2023. 02 June. DOI: 10.3389/fpls.2023.1110622.
3. Чумикина Л.В., Арапова Л.И., Колпакова В.В., Топунов А.Ф. Фитогормоны и абиотические стрессы (обзор) // Химия растительного сырья. 2021. № 4. С. 5–30. DOI: 10.14258/jcrpm.2021049196.
4. Hatamleh A.A., Danish M., Al-Dosary M.A., El-Zaidy M., Ali S. Physiological and oxidative stress responses of *Solanum lycopersicum* (L.) (tomato) when exposed to different chemical pesticides // *Royal Society of Chemistry Advances*. 2022. Vol. 12. P. 7237–7252. DOI: 10.1039/D1RA09440H.
5. Zelm E., Zhang Y., Testerink C. Salt Tolerance Mechanisms of Plants: Review Article // *Annual Review of Plant Biology*. 2020. Vol. 71. P. 403–433. DOI: 10.1146/annurev-arplant-050718-100005.
6. Madhu P.M., Sadagopan R.S. Effect of Heavy Metals on Growth and Development of Cultivated Plants with Reference to Cadmium, Chromium and Lead: A Review // *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*. 2020. Vol. 16. N 3. P. 84–102.
7. Gladkov E.A. Cell selection to increase lawn grass resistance to lead pollution // *Ecomed*. 2023. Vol. 30. N 9. P. 24771–24778. DOI: 10.1007/s11356-023-25437-3.
8. Степанова А.Ю., Соловьева А.И., Ташлиева И.И., Гладков Е.А. Изучение взаимосвязи между устойчивостью к меди (как к неблагоприятному экологическому фактору) и окислительным стрессом на примере каллусов льна многолетнего (*Linum perenne* L.) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2019. Т. 5 (71). № 4. С. 137–145.

³Пиццик В.Н., Воробьев Н.И., Проворов Н.А., Хомяков Ю.В. Механизмы адаптации растений к тяжелым металлам // *Агрофизика*. 2015. № 2. С. 38–49.

9. Башмаков Д.И. Индекс адаптации растений к тяжелым металлам // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 84–94. DOI: 10.21685/2307-9150-2022-2-8.
10. Dumanović J., Nepovimova E., Natić M., Kuća K., Jačević V. The significance of reactive oxygen species and antioxidant defense system in plants: a concise overview // *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 11. DOI: 0.3389/fpls.2020.552969.
11. Соловых Н.В., Будаговская О.Н., Будаговский А.В. Отбор *in vitro* толерантных к хлориду натрия и глифосату растений ежевики методом хлорофиллфлуориметрии // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 8. С. 60–66.
12. Kumar N., Singh H., Sharma S.K. Antioxidants: responses and importance in plant defense system // *Sustainable agriculture in the era of climate change* / eds. R. Roychowdhury, S. Choudhury, M. Hasanuzzaman, S. Srivastava. Springer. 2020. July. P. 251–264. DOI: 10.1007/978-3-030-45669-6_11.
13. Hajam Y.A., Lone R., Kumar R. Role of plant phenolics against reactive oxygen species (ROS) induced oxidative stress and biochemical alterations // *Plant phenolics in abiotic stress management* / eds. R. Lone, S. Khan, Mohhamed A. Al-Sadi. Springer. 2022. January. P. 125–147. DOI: 10.1007/978-981-19-6426-8_7.
4. Hatamleh A.A., Danish M., Al-Dosary M.A., El-Zaidy M., Ali S. Physiological and oxidative stress responses of *Solanum lycopersicum* (L.) (tomato) when exposed to different chemical pesticides. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2022, vol. 12, pp. 7237–7252. DOI: 10.1039/D1RA09440H.
5. Zelm E., Zhang Y., Testerink C. Salt Tolerance Mechanisms of Plants: Review Article. *Annual Review of Plant Biology*, 2020, vol. 71, pp. 403–433. DOI: 10.1146/annurev-arplant-050718-100005.
6. Madhu P.M., Sadagopan R.S. Effect of Heavy Metals on Growth and Development of Cultivated Plants with Reference to Cadmium, Chromium and Lead: A Review. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 2020, vol. 16, no. 3, pp. 84–102.
7. Gladkov E.A. Cell selection to increase lawn grass resistance to lead pollution. *Ecomed*, 2023, vol. 30, no. 9, pp. 24771–24778. DOI: 10.1007/s11356-023-25437-3.
8. Stepanova A.Yu., Solov'eva A.I., Tashieva I.I., Gladkov E.A. The relationship between copper resistance (an adverse ecological factor) and oxidative stress in calluses of perennial flax (*Linum perenne* L.). *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo Biologiya. Khimiya = Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*. 2019, vol. 5 (71), no. 4, pp. 137–145. (In Russian).

REFERENCES

1. Putina O.V., Besedin A.G. Abiotic stressors and their effect on the accumulation of assimilates by plants and the yield of vegetable pea. *Trudy po prikladnoi botanike, genetike i seleksii = Proceedings on applied botany, genetics and breeding*, 2019, vol. 180, no. 2, pp. 51–59 (In Russian). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-2-51-59.
2. Mishra N., Jiang C., Chen L., Paul A., Chatterjee A., Shen G.. Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 02 June. DOI: 10.3389/fpls.2023.1110622.
3. Chumikina L.V., Arabova L.I., Kolkpova V.V., Topunov A.F. Phytohormones and abiotic stress (review). *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya = Chemistry of plant raw material*, 2021, no. 4, pp. 5–30 (In Russian). DOI: 10.14258/jcprm.2021049196.
9. Bashmakov D.I. Plant adaptation index to heavy metals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Estestvennye nauki = University proceedings. Volga Region. Natural Sciences*, 2022, no. 2, pp. 84–94. (In Russian). DOI: 10.21685/2307-9150-2022-2-8.
10. Dumanović J., Nepovimova E., Natić M., Kuća K., Jačević V. The significance of reactive oxygen species and antioxidant defense system in plants: a concise overview. *Frontiers in Plant Science*, 2021, vol. 11. DOI:10.3389/fpls.2020.552969.
11. Solovykh N.V., Budagovskaya O.N., Budagovsky A.V. In vitro selection of sodium chloride and glyphosate tolerant blackberry plants using chlorophyll fluorimetry. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*, 2023, no. 8, pp. 60–66. (In Russian).

12. Kumar N., Singh H., Sharma S.K. Antioxidants: responses and importance in plant defense system. *Sustainable agriculture in the era of climate change*, eds. R. Roychowdhury, S. Choudhury, M. Hasanuzzaman, S. Srivastava Springer, 2020, july, pp. 251–264. DOI: 10.1007/978-3-030-45669-6_11
13. Hajam Y.A., Lone R., Kumar R. Role of plant phenolics against reactive oxygen species (ROS) induced oxidative stress and biochemical alterations. *Plant phenolics in abiotic stress management*, eds. R. Lone, S. Khan, A. Mohhamed Al-Sadi. Springer, 2022, january, pp. 125–147. DOI: 10.1007/978-981-19-6426-8_7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

✉ **Соловых Наталья Владимировна**, ведущий научный сотрудник, кандидат биологических наук; SPIN-код 5174-4970; **адрес для переписки**: Россия, 393774, Тамбовская область, Мичуринск, ул. Мичурина, 30; e-mail: natalyasolovykh@yandex.ru

Будаговский Андрей Валентинович, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, доктор технических наук; SPIN-код 9901-9144

Будаговская Ольга Николаевна, ведущий научный сотрудник, доктор технических наук; SPIN-код 3376-5851

AUTHOR INFORMATION

✉ **Natalia V. Solovykh**, Lead Researcher, Candidate of Science in Biology; SPIN-code 5174-4970; **address**: 30, Michurina St., Michurinsk, Tambov Region, 393774, Russia; e-mail: natalyasolovykh@yandex.ru

Andrey V. Budagovsky, Laboratory Head, Lead Researcher, Doctor of Science in Engineering; SPIN-code 9901-9144

Olga N. Budagovskaya, Lead Researcher, Doctor of Science in Engineering; SPIN-code 3376-5851

Дата поступления статьи / Received by the editors 18.10.2025
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 12.11.2025
Дата публикации / Published 12.05.2026