

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-169-175>
УДК: (635.5+633.11):581.1.046

М.М. Годяева^{1,2}, Т.А. Парамонова¹,
А.А. Дорохов², М.С. Широкова²

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, факультет Почвоведения 119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр.12

²ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» 109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5

*Автор для переписки: airrune@yandex.ru

Финансирование. Данное исследование выполнено в рамках государственного задания FGUN-2025-0003 и FGUN-2025-0008.

Вклад авторов: Годяева М.М.: концептуализация, методология, проведение исследования, создание рукописи и ее редактирование, визуализация. Парамонова Т.А.: проведение исследований, верификация данных, формальный анализ. Дорохов А.А.: администрирование данных, верификация данных. Широкова М.С.: проведение исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Годяева М.М., Парамонова Т.А., Дорохов А.А., Широкова М.С. Особенности стрессовых реакций однодольных и двудольных растений в присутствии биодоступных соединений свинца на примере салата посевного (*Lactuca sativa* L.) и пшеницы яровой (*Triticum aestivum* L.). *Овощи России*. 2025;(6):169-175.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-169-175>

Поступила в редакцию: 29.10.2025

Принята к печати: 05.12.2025

Опубликована: 18.12.2025

Maria M. Godyaeva^{1,2}, Tatyana A. Paramonova¹,
Artem A. Dorokhov², Maria S. Shirokova²

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science 1/12, Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia

²Federal State Budgetary Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM" 5, 1st Institutsky passage, Moscow, 109428, Russia

*Corresponding Author: airrune@yandex.ru

Funding. This study was carried out within the framework of the state assignment FGUN-2025-0003 and FGUN-2025-0008.

Authors' Contribution: Godyaeva M.M.: conceptualization, methodology, investigation, writing – original draft, visualization. Paramonova T.A.: investigation, data curation, formal analysis. Dorokhov A.A.: data curation, data verification. Shirokova M.S.: investigation.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citations: Godyaeva M.M., Paramonova T.A., Dorokhov A.A., Shirokova M.S. Assessment of stress reactions of monocotyledonous and dicotyledonous plants in the presence of bioavailable lead compounds by the example of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):169-175. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-169-175>

Received: 29.10.2025

Accepted for publication: 05.12.2025

Published: 18.12.2025

Особенности стрессовых реакций однодольных и двудольных растений в присутствии биодоступных соединений свинца на примере салата посевного (*Lactuca sativa* L.) и пшеницы яровой (*Triticum aestivum* L.)

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Возрастающий спрос на овощные культуры стимулирует развитие круглогодичного производства сельскохозяйственных культур, – в системах открытого и закрытого грунта. Однако техногенное загрязнение тяжелыми металлами, в частности свинцом, представляет серьезную угрозу для безопасности растениеводческой продукции. Свинец относится к приоритетным загрязнителям сельскохозяйственных почв и субстратов, поскольку даже при концентрациях до 50 мг/кг способен вызывать фитотоксичность и накапливаться в товарной части урожая.

Материалы и методы. В качестве модельных объектов исследования использовались салат посевной (*Lactuca sativa* L.) сорта Азарт и пшеница яровая (*Triticum aestivum* L.) сорта Иволга. Растения культивировали в гидропонной системе с использованием стерилизованного торфа в качестве субстрата. Ацетат свинца ($Pb(CH_3COO)_2$) вносили в трех вариантах концентраций: 0 (контроль), 25 и 50 мг/кг. Эксперимент проводили в трех повторностях. На 7-й и 45-й дни культивирования определяли биометрические параметры (сырую и сухую массу растений), содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов), концентрацию свинца в корнях и надземных органах методом атомно-эмиссионной спектроскопии (ICP-AES), а также активность ключевых антиоксидантных ферментов – каталазы (CAT) и супероксиддисмутазы (SOD).

Результаты. На начальном этапе эксперимента (7-й день) существенных различий по биометрическим показателям между однодольными и двудольными культурами не обнаружено. К 45-му дню при средней концентрации свинца снижение сырой массы пшеницы было на 4,9% меньше по сравнению с салатом, при максимальной концентрации (50 мг/кг) депрессия роста салата достигла 29,7%, тогда как у пшеницы показатели были значительно ниже. Анализ аккумуляции показал, что пшеница преимущественно локализует свинец в корневой системе, демонстрируя выраженную барьерную функцию, в то время как у салата распределение металла между корнями и побегами более равномерно. Исследование антиоксидантных ферментов выявило, что при усилении стресса активность CAT возрастает, а SOD снижается у обеих культур, при этом у салата преобладает активность CAT, а у пшеницы – SOD, что свидетельствует о сохранении ферментативного баланса и адаптивной регуляции уровня активных форм кислорода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

тяжелые металлы, свинец, каталаза, фитотоксичность, гидропоника, *Lactuca sativa*, *Triticum aestivum*

Assessment of stress reactions of monocotyledonous and dicotyledonous plants in the presence of bioavailable lead compounds by the example of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and spring wheat (*Triticum aestivum* L.)

ABSTRACT

Relevance. The increasing demand for vegetable crops stimulates the development of their year-round production, including both open and protected ground systems. However, man-made pollution with heavy metals, in particular lead, poses a serious threat to the safety of crop production. Lead is one of the priority pollutants of agricultural soils and substrates, since even at concentrations up to 50 mg/kg it can cause phytotoxicity and accumulate in the commercial part of the crop.

Materials and Methods. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) of the Azart variety and wheat (*Triticum aestivum* L.) of the Ivolga variety were used as model objects of research. The plants were cultivated in a hydroponic system using sterilized peat as a substrate. Lead Acetate ($Pb(CH_3COO)_2$) was applied in three concentrations: 0 (control), 25 and 50 mg/kg. The experiment was carried out in three repetitions. On the 7th and 45th days of cultivation, biometric parameters (wet and dry plant mass), the content of photosynthetic pigments (chlorophylls *a*, *b* and carotenoids), the concentration of lead in roots and above-ground organs were determined by atomic emission spectroscopy (ICP-AES), as well as the activity of key antioxidant enzymes, catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD).

Results. At the initial stage of the experiment (day 7), no significant differences in biometric parameters were found between the cultures. By day 45, with an average concentration of lead, the decrease in the crude weight of wheat was 4.9% less than in lettuce, with a maximum concentration (50 mg/kg), the lettuce growth depression reached 29.7%, while in wheat the indicators were significantly lower. Accumulation analysis showed that wheat mainly localizes lead in the root system, demonstrating a pronounced barrier function, while lettuce has a more uniform distribution of metal between roots and shoots. The study of antioxidant enzymes revealed that, with increased stress, catalase activity increases and superoxide dismutase decreases in both crops, while lettuce is dominated by CAT activity and wheat by SOD, which indicates the preservation of enzymatic balance and adaptive regulation of the level of reactive oxygen species.

KEYWORDS:

heavy metals, lead, catalase, phytotoxicity, hydroponics, *Lactuca sativa*, *Triticum aestivum*

Введение

Поступление тяжелых металлов, в частности свинца, в пищевую продукцию, является одной из наиболее острых проблем, обусловленных интенсивной антропогенной деятельностью, актуальных для современной продовольственной безопасности. Свинец поступает в окружающую среду из многочисленных источников: металлургического производства, сжигания топлива, применения пестицидов и удобрений, производства аккумуляторов, однако в гидропонные растворы соединения свинца чаще попадают из комплексов микроэлементов, водопроводной воды и из материала фиттингов и труб. По классификации Агентства по охране окружающей среды, свинец занимает второе место среди наиболее опасных для здоровья человека химических веществ, уступая только мышьяку [1, 2].

В отличие от эссенциальных микроэлементов, свинец не является необходимым для метаболизма растений и проявляет выраженную фитотоксичность даже при небольших концентрациях в растворе, однако в почве его биодоступность для растений значительно ограничена, в связи с низкой мобильностью [3]. Биодоступность свинца для растений определяется комплексом физико-химических свойств почвы. pH является одним из ключевых факторов: в кислой среде ($pH < 6.5$) повышается подвижность ионов свинца за счет протонирования поверхностных функциональных групп почвенных коллоидов [4]. Содержание органического вещества (ОВ) оказывает двойственное влияние: с одной стороны, гумусовые соединения (фульво- и гуминовые кислоты) способны образовывать прочные комплексы со свинцом, снижая его мобильность, однако низкомолекулярные органические кислоты, понижая pH, могут способствовать мобилизации свинца [5, 6, 7]. Емкость катионного обмена (ЕКО) почвы демонстрирует сильную отрицательную корреляцию с аккумуляцией свинца в растениях. Почвы с высокой ЕКО обладают большей способностью адсорбировать катионы тяжелых металлов, что снижает концентрацию свинца в почвенном растворе. Гранулометрический состав также играет существенную роль: глинистые почвы демонстрируют более высокую сорбционную способность по отношению к свинцу по сравнению с почвами более легкого гранулометрического состава [8].

Биодоступность свинца в гидропонных системах существенно выше, чем в почве и зависит от формы химического соединения, используемого в эксперименте. В гидропонике весь свинец находится в водорастворимой и коллоидной формах и непосредственно контактирует с корневой системой, что значительно увеличивает его биодоступность для растений [9, 10, 11]. Форма соединения свинца играет критическую роль в его биодоступности. Ацетат свинца $Pb(CH_3COO)_2$ является одной из наиболее биодоступных форм из-за высокой растворимости в воде. При использовании в эксперименте сульфата свинца $PbSO_4$, биодоступность металла для растений значительно снижается вследствие низкой растворимости этого соединения в воде и чувствительности к pH, что приводит к депривации аккумуляции в корнях [12, 13, 14].

Органические кислоты, особенно лимонная, образуют комплексы со свинцом в растворе, усиливая его поглощение корнями и транслокацию в надземные части растения из прикорневых эксудатов. В эксперименте с добавлением различных концентраций ацетата свинца (0–50 мг/л) к гидропонному раствору, содержащему 50 мг/л Pb, аккумуля-

ция свинца в побегах индийской горчицы увеличилась в 3 раза с 2,05 до 6,42 мг/кг [15].

В связи с высокой фитотоксичностью существует ряд особенностей поглощения и транслокации данного тяжелого металла. Имобилизация в клеточных стенках корней является первичной линией защиты: до 90% поглощенного свинца может быть связано с пектинами и гемицеллюлозами клеточных стенок – таким образом проявляется корневая барьерная функция. Компартментация в вакуолях с участием фитохелатов и металлотионеинов представляет вторую линию защиты, позволяющую изолировать ионы свинца от чувствительных метаболических процессов в цитоплазме [16, 17, 18].

Салат посевной (*L. sativa*) и пшеница яровая (*T. aestivum*) представляют собой важные сельскохозяйственные культуры, широко возделываемые в различных климатических зонах и почвенно-климатических условиях. Салат посевной является типичным представителем двудольных растений, а также распространенной культурой для модельных опытов и самой распространенной гидропонной культурой [19]. Обладая относительно недолгим (45–55 дней) вегетационным циклом, салат является важным диетическим продуктом, содержащим полифенолы, каротиноиды, хлорофилл, а также большое количество витамина С [20, 21]. Яровая пшеница – важнейшая продовольственная сельскохозяйственная культура, почти не выращивается в условиях гидропонии как пищевой продукт, однако этот способ культивирования используют для селекционной работы над получением новых сортов. Пшеница высокопродуктивна, неприхотлива и обладает средним по продолжительности вегетационным циклом (90–120 дней). Она обеспечивает от 10 до 50% мирового населения как основной источник калорий и белка, занимая лидирующее место среди всех зерновых. Ее уникальный аминокислотный состав, высокое содержание белка (особенно глютена), минеральных веществ и пищевых волокон делает этот продукт универсальным для производства широкого спектра пищевых продуктов (хлеб, макароны, крупы и др.) [22]. Являясь одной из наиболее изученных и технически сопровождаемых (моделирование, подбор сортов, адаптационные практики) сельскохозяйственных культур, этот злак используется для прогнозирования рисков, связанных с экологическими проблемами. Тем актуальнее становятся селекционные исследования, способные предотвратить развитие этого сценария, в том числе гидропонные модельные опыты.

Однодольные и двудольные растения различаются по целому ряду анатомо-морфологических и биохимических характеристик, которые потенциально могут влиять на устойчивость к воздействию фитотоксичных элементов [23, 24]. К таким различиям относятся структура корневой и организация проводящей систем, биохимические реакции и другие факторы. Однако сравнительные исследования стрессовых реакций представителей этих двух классов покрытосеменных растений в условиях присутствия в растворе биодоступных форм свинца остаются малочисленными. Имеющиеся данные указывают на существование видоспецифичных механизмов ответа, однако систематические исследования различий между однодольными и двудольными видами в контексте Pb-стресса практически отсутствуют.

Накопление избыточных количеств АФК при Pb-стрессе нарушает прооксидантно-антиоксидантный гомеостаз и

приводит к каскаду деструктивных процессов: перекисно-му окислению липидов мембран, окислительной модификации белков, повреждению ДНК, утечке электролитов, редокс-дисбалансу и, в конечном итоге, к активации программируемой клеточной смерти. В ответ на окислительный стресс растения активируют многокомпонентную антиоксидантную систему защиты, включающую как ферментативные компоненты – супероксиддисмутазу (SOD), каталазу (CAT), аскорбатпероксидазу (APX), глутатионредуктазу (GR), глутатионпероксидазу (GPX), пероксидазу (POD) и другие ферменты, так и неферментативные антиоксиданты – аскорбиновую кислоту, глутатион, токоферолы, каротиноиды, фенольные соединения и флавоноиды [25, 26, 27, 28].

Среди ферментативных компонентов антиоксидантной защиты SOD и CAT играют ключевые роли в детоксификации первичных АФК, функционируя как первая линия защиты клетки от окислительных повреждений. SOD осуществляет дисмутацию высокореактивного супероксидного анион-радикала в менее токсичный пероксид водорода и молекулярный кислород, тогда как CAT катализирует разложение образовавшегося H_2O_2 на воду и кислород. Скоординированное функционирование этих двух ферментов обеспечивает последовательную нейтрализацию АФК и поддержание редокс-гомеостаза клетки. Эффективность работы системы SOD-CAT во многом определяет устойчивость растений к Pb-индуцированному окислительному стрессу и является важным критерием отбора толерантных генотипов для выращивания на загрязнённых почвах [29], [30].

Целью данной работы является определение морфологических и биохимических реакций растений салата посевного (*L. sativa*) и пшеницы яровой (*T. aestivum*) в условиях интоксикации в присутствии разных концентраций биодоступных соединений свинца.

Материалы и методы

Эксперимент был проведен в Федеральном Агротехническом Научном Центре ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2025 году.

Объекты исследований

Салат сорта Азарт (Гавриш, Россия) – полукочанный сорт универсального назначения, предназначенный для использования как в открытом, так и в защищённом грунте. Сорт относится к среднеспелым разновидностям. Вегетационный период от полных всходов до технической спелости составляет 45 дней (в диапазоне 40–50 дней). Растения отличаются мощным строением: высота куста составляет 23–27 см, диаметр розетки листьев – 21–25 см. Масса одного растения варьируется от 150 до 200 г. Розетка листьев приподнятая, с крупными листьями веерообразной формы, окрашенными в зелёный оттенок. Урожайность составляет 4,3–4,5 кг/м².

Пшеница сорта Иволга была выведена методом индивидуального отбора из гибридной популяции (Яра Ч Лютесценс 39). Это сорт мягкой яровой пшеницы (*T. aestivum*), разновидность 'lutescens'. Оригинатором является ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. «Иволга» относится к среднерослым и среднеспелым сортам, высота растений составляет 90–100 см. Вегетационный период составляет 80–90 дней. Масса 1000 семян варьируется в широком диапазоне: 27–38 г, средняя урожайность достигает 2,68 т/га.

Семена высевали в емкости объемом 500 мл, заполненные субстратом. В качестве субстрата использовали верховой нейтральный торф (pH 6,0–6,5) фракции 5–20 мм для улучшения дренажных свойств. Торф предварительно автоклавировали при 121°C в течение 60 минут для стерилизации и исключения микробной активности, которая могла бы повлиять на биодоступность свинца. Растения выращивали в условиях контролируемой среды при фотопериоде 16/8 часов (день/ночь), температуре 24°C, относительной влажности 60–70% и освещенности 250 мкмоль м⁻² с⁻¹нм. В качестве питательного раствора использовали модифицированный раствор Хогланда с pH 6,2±0,5. На третий день после появления всходов в субстрат вносили раствор ацетата свинца ($Pb(CH_3COO)_2$) как наиболее биодоступную форму этого металла в концентрациях: 0 (контроль), 25 и 50 мг/л. Каждый вариант опыта включал 3 статистические повторности (рис. 1).

Полив проводили модифицированным раствором Хогланда 2 раза в неделю до полного насыщения субстрата. Объем вносимого раствора: 75 мл на сосуд. Сырую (свежую) массу определяли непосредственно после отбора проб взвешиванием на аналитических весах Sartorius CPA225D (Германия) с точностью до 0,001 г. Для определения сухой массы растительный материал высушивали в сушильном шкафу Binder FD 115 (Германия) при температуре 70°C.

Анализ содержания свинца в растительных образцах

Количественное определение Pb в подземной и надземной биомассе растений проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой, выполненное на ИСП ОЭС iCap6300duo (Thermo



Рис. 1. Растения салата на 45 день опыта
Fig. 1. Photograph of the experiment conducted using the example of lettuce plants

S с., США) по методу Литвинского [31]. Для пробоподготовки использовали систему микроволнового разложения Berghof Speedware Entry (Бергхоф, Германия).

Определение хлорофилла в растительных образцах

Общее содержание хлорофилла в 100% ацетоновом экстракте определяли спектрофотометрически. Ацетон является одним из наиболее часто используемых растворителей для определения хлорофилла, поскольку выраженность пиков поглощения в красной области спектра наиболее велика именно в ацетоне. Для анализа брали 0,1 г свежей листовой массы и гомогенизировали с растворителем. Полученную смесь фильтровали через стеклянный

фильтр с диаметром пор 40–100 мкм. Оптическую плотность определяли UV-VIS спектрофотометре модели MT-M (VV300/2) (Китай) при длинах волн 662 нм и 644 нм, используя в качестве контрольного образца 100%-ный ацетон и толщину поглощающего слоя в кюветах 10 мм. Количественную концентрацию пигментов рассчитывали по методу Хольма–Веттштейна (для 100%-ного ацетона) [32, 33].

Оценка активности каталазы (CAT)

Активность каталазы определяли по методу Айби (Aebi). Для этого 1 г свежей листовой массы гомогенизировали в 10 мл калий-фосфатного буфера (pH 7,0). Гомогенат фильтровали и центрифугировали при 8000 g в течение 10 мин для получения прозрачного супернатанта. Для анализа 2,9 мл фосфатного буфера (pH 7,0) смешивали с 25 мкл ферментного экстракта. Для инициирования реакции в раствор добавляли 90 мкл 3%-ного раствора перекиси водорода (H_2O_2). С помощью спектрофотометра измеряли уменьшение оптической плотности при 240 нм в минуту. Активность фермента рассчитывали в ммоль·г⁻¹·мин⁻¹·г с использованием молярного коэффициента экстинкции (ϵ), равного 39,4 мм²·г⁻¹·см⁻¹ [34].

Оценка активности супероксиддисмутазы (SOD)

Для определения SOD было отобрано 0,5 г свежей листовой массы, промыто дистиллированной водой и заморожено жидким азотом. Был подготовлен экстракционный буфер включающий калий-фосфатный буфер 50 mM, pH 7,5, EDTA-Na 1 mM, 1%. поливинилпирролидон (PVP) Замороженные образцы гомогенизировались в фарфоровой ступке с 3 холодного экстракционного буфера. Гомогенат был перенесён в пробирку и отцентрифугирован при 15000 оборотов. Сразу перед засветкой в супернатант добавлялся ферментный экстракт, состоящий из метионина (0,3 мл, 13 mM), калий-фосфатного буфера (1,5 мл, 50 mM, pH 7,8), EDTA-Na (0,3 мл, 0,1 mM), NBT (0,3 мл, 75 мкМ), дистиллированной воды (0,3 мл). В последнюю очередь добавлялось 0,3 мл 2 ммоль рибофлавина.

Экспериментальные образцы помещали под 15-ваттную флуоресцентную лампу на 15 минут, затем их анализировали на спектрофотометре модели MT-M (VV300/2) (Китай) при длине волны 560 нм [35].

Статистический анализ данных. Для проведения статистического анализа использовался MS Excel 2016 и пакет программ StatSoft Statistica. Эксперимент проводили в трёхкратной повторности.

Результаты

Исходя из полученных данных, мы можем утверждать, что присутствует статистически достоверная разница между фитотоксическим влиянием свинца на сырую и сухую массу однодольных и двудольных растений (рис. 2). В созданных нами оптимальных условиях растения салата фактически достигли товарной спелости - в среднем растения контроля весили более 85 г, а пшеница достигла фазы кущения, некоторые растения соответствовали фазе выхода в трубку и весили в среднем 66,4 г. Эти данные согласуются с Ikkonen E. и Kaznina N. (2022) и подтверждают правильность постановки эксперимента [36].

Растения пшеницы в среднем более толерантны к присутствию в субстрате соединений свинца, понижение сырой массы на 45 день при добавлении средних концентраций на 4,9% ниже, чем аналогичное значение у растений салата, которые в целом более радикально реагируют на присутствие токсиканта – снижение сырой массы у салата на 45 день в присутствии максимальной концентрации свинца составило 29,7%. При этом на 7 день культивирования уменьшение массы при больших концентрациях Pb у однодольных и двудольных культур было мало выражено либо близко к погрешности и у показателя сухой, и у сырой массы.

Оценивая аккумуляцию свинца в растения однодольных и двудольных культур, необходимо отметить, что в целом пшеница накапливает большее количество экотоксиканта, с преобладанием его в корнях, что демонстрирует их барьер

Влияние концентрации свинца на биомассу растений

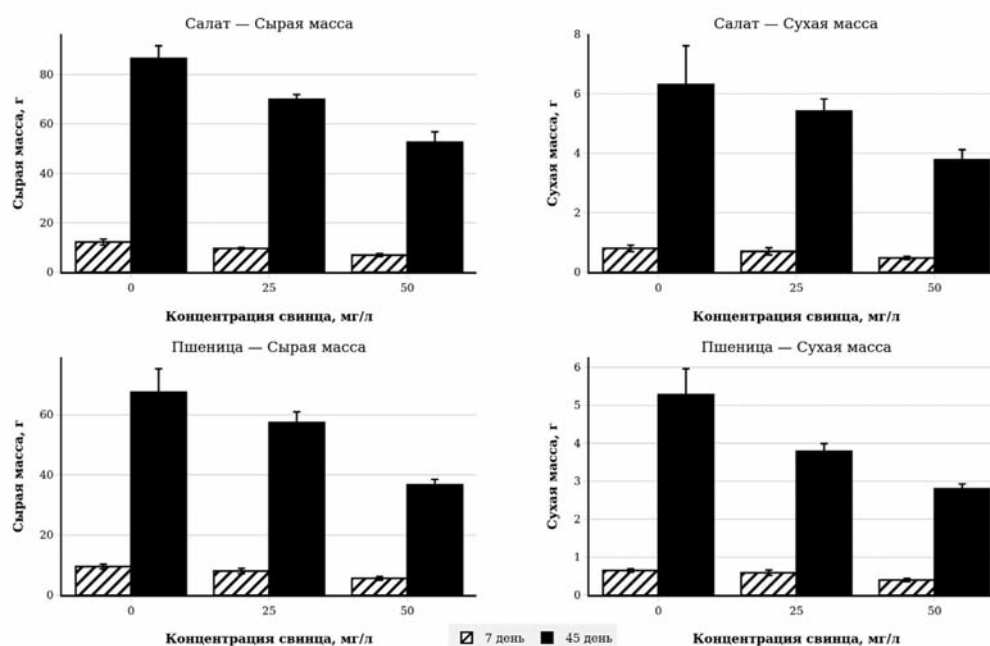


Рис. 2. Вариация свежей и сухой массы экспериментальных растений в присутствии разных концентраций Pb
Fig. 2. Variation of fresh and dry weight of experimental plants in the presence of different concentrations of Pb

ерную функцию. Это утверждение справедливо как для максимальной представленной в опыте концентрации (50 мг/кг), так и для 25 мг/кг. Растения салата аккумулируют данный тяжёлый металл относительно равномерно, с увеличением концентрации Pb доля его аккумуляции в побегах растёт.

Фотосинтетические системы достаточно чувствительны к биохимическим процессам внутри растения. Изменения, происходящие внутри комплексов тесно связаны с количественным изменением соотношения пигментов и их концентрации в фотосинтезирующих тканях растений. Измерения проводились на 45 день, оценивалась концентрация общего хлорофилла, хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов (рис. 3). В целом, с увеличением концентрации экотоксиканта в виде свинца, фотосинтетическая активность и концентрация общего хлорофилла падает. Это утверждение верно как для однодольных, так и для двудольных растений, однако у двудольных растений

депривация фотосинтетических процессов в присутствии экотоксиканта происходит более активно, о чём свидетельствует понижение концентрации общего хлорофилла у растений салата на 0,69 мг/кг, тогда как у пшеницы этот показатель составит 0,5 мг/кг.

В присутствии 25 мг/кг свинца у растений пшеницы не наблюдалось существенных различий в концентрации фотосинтетических пигментов, в отличие от салата, для которого незначительным является только изменение концентрации каротиноидов в листьях.

Салат наименее подвержен изменению концентрации хлорофилла *b*.

Анализ активности стрессовых ферментов, таких как каталаза и супероксиддисмутаза, является наиболее точным методом оценки каталитического стресса и накопления пероксида водорода в тканях растений. Так как согласно [37, 38], добавленная нами концентрация Pb не приближается к порогу летальности и фитотоксичность при ней выражена умеренно, значения каталитических ферментов стабильны и ненамного превышают норму (от 3 до 7 для CAT, от 14 до 16 для SOD). Стоит отметить, что при повышении стресса CAT растёт, а SOD падает, что создаёт определённый ферментативный баланс, помогающий растению справиться с фитотоксическим действием контаминанта. В нашем эксперименте у представителей однодольных двудольных культур сохранён ферментативный баланс и несколько повышены значения каталазы для максимальной концентрации Pb, причём кажущееся преобладание активности каталазы у растений салата минимизируется изначальными значениями стрессовых ферментов. В целом, CAT у растений салата выше, тогда как у пшеницы выше значение SOD.

Обобщая вышеизложенные данные, необходимо отметить, что несмотря на слабую выраженность фитотоксичности соединений свинца в концентрациях 25 мг/кг и 50 мг/кг, растения однодольных и двудольных культур аккумулируют данный тяжёлый металл из субстратов и про-

Рис. 3. Аккумуляция Pb в надземных и подземных органах экспериментальных растений на 45 день эксперимента
Fig. 3. Accumulation of Pb in aboveground and underground organs of experimental plants on the 45th day of the experiment

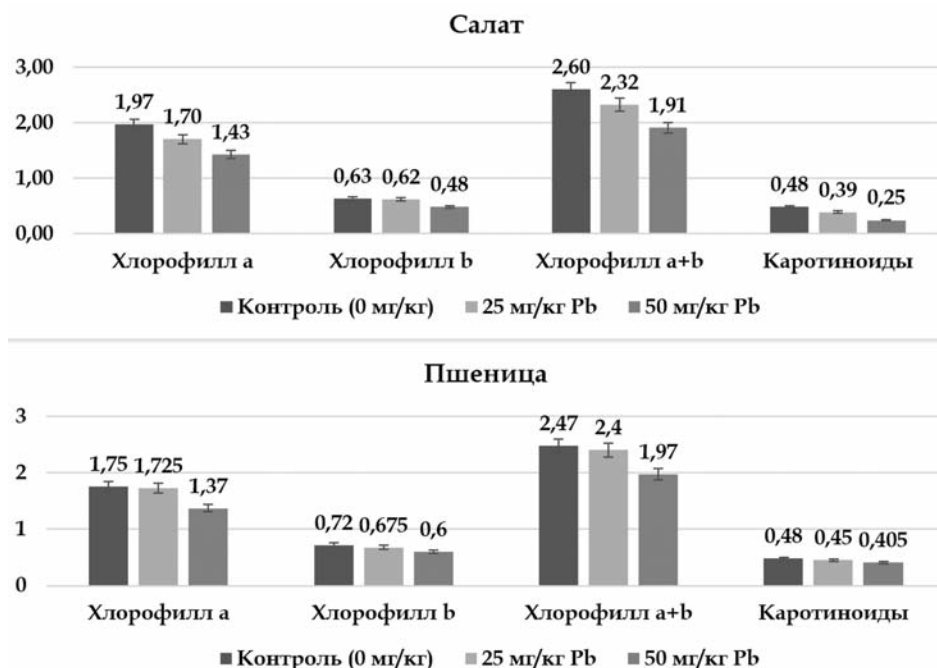
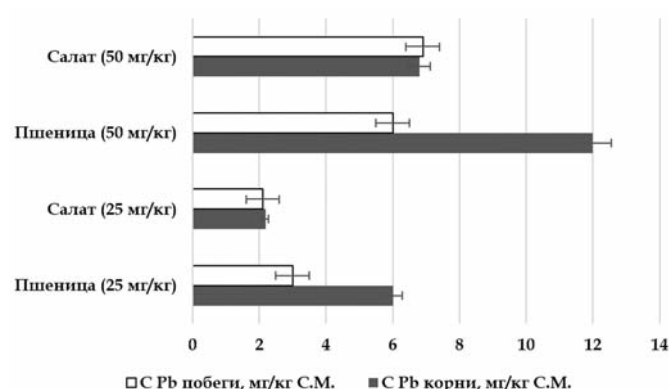


Рис. 4. Концентрации пигментов в надземной биомассе растений салата посевного сорта Азарт и пшеницы яровой сорта Иволга на 45 день эксперимента
Fig. 4. Pigments concentrations in the aboveground biomass of lettuce plants of the Azart seed variety and wheat of the Ivolga variety on the 45th day of the experiment

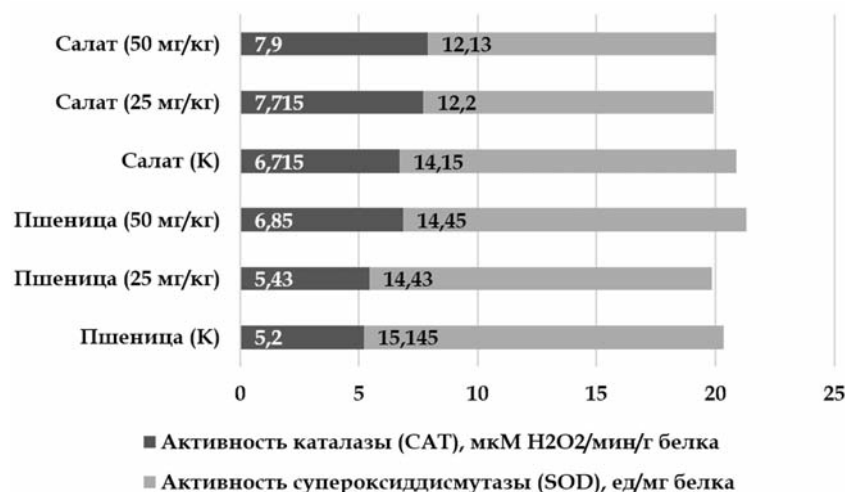


Рис. 5. Оценка активности каталазы (CAT) и супероксиддисмутазы (SOD) для растений салата посеянного сорта Азарт и пшеницы яровой сорта Иволга на 45 день эксперимента

Fig. 5. Evaluation of catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD) activity for Azart lettuce and Ivola wheat on day 45 of the experiment

являют биохимические и физиологические реакции, в ответ на стрессовое воздействие.

Заключение

Данное исследование выявило, что в присутствии нелетальных концентраций биодоступного свинца, стратегии защитных реакций однодольных и двудольных культур различались. Пшеница, как представитель однодольных, оказалась более устойчива к каталитическому стрессу, как и другие представители злаков [39]. На начальном этапе культивирования (7-й день) существенных различий между однодольными и двудольными культурами по биометрическим параметрам не выявлено. При этом аккумуляция свинца у пшеницы происходила более активно, в особенности в подземных органах, выявляя барьерную функцию корней, не свойственную двудольным растениям, в частности, салату. На 45-й день эксперимента снижение сырой массы пшеницы при средней концентрации свинца было на 4,9% меньше, чем у салата. Салат, напротив, демонстрирует относительно равномерное распределение свинца между корнями и побегами, причем с увеличением концентрации контаминанта доля металла в надземной части возрастает. Это указывает на менее эффективную барьерную функцию корней у двудольных растений и повышает риски накопления свинца в товарной продукции. Анализ

содержания фотосинтетических пигментов на 45-й день эксперимента выявил общую тенденцию к снижению концентрации хлорофилла при возрастании содержания свинца в субстрате. Однако у салата депривация фотосинтеза выражена более значительно: снижение общего хлорофилла составило 0,69 мг/кг, тогда как у пшеницы – 0,5 мг/кг. При концентрации 25 мг/кг свинца у пшеницы фотосинтетические нарушения практически не обнаружены, в отличие от салата, у которого уже проявились изменения.

Исследование активности ключевых антиоксидантных ферментов – CAT и SOD показало, что при использованных свинца в обеих концентрациях фитотоксичность выражена умеренно, и у обеих культур сохраняется ферментативный баланс. С усилением стресса активность каталазы возрастает, а супероксиддисмутазы снижается, что обеспечивает адаптивную регуляцию уровня активных форм кислорода. У салата активность каталазы выше, тогда как у пшеницы преобладает активность супероксиддисмутазы.

Выявленные различия в стратегиях адаптации однодольных и двудольных культур к свинцовой интоксикации имеют важное значение для оценки рисков загрязнения пищевой продукции и разработки агротехнических приемов минимизации накопления тяжелых металлов в товарной части урожая.

• Литература / References

1. Kumar A., Prasad M.N.V. Lead-induced toxicity and interference in chlorophyll fluorescence in *Talinum triangulare* grown hydroponically. *Photosynthetica*. 2015;53(1):66–71. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0091-8>
2. Sandadevani K.S., Sooriyaarachchi S.K.M., Weerakkody W.A.P., Gunarathna R.M.K.D. Effect of Grow Medium and Hydroponics Fertilizer on Iceberg Lettuce (*Lactuca sativa* var. *capitata*) Cultivation. *Journal of Agricultural Production*. 2025;6(1):61–69. <https://doi.org/10.56430/japro.1599979>
3. Zheljazkov V.D., Craker L.E., Xing B. Effects of Cd, Pb, and Cu on growth and essential oil contents in dill, peppermint, and basil. *Environ Exp Bot*. 2006;58(1–3):9–16. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.06.008>
4. Whitacre D.M. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 213, vol. 213. in *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. New York, NY: Springer New York, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9860-6>

5. Greger M. 6 Trace Elements and Radionuclides in Edible Plants.
6. X. Wang et al. Heavy Metal Accumulation in Maize and Wheat in Acidic Soil: A Comparative Study. *Sustainability (Switzerland)*. 2025;17(5). <https://doi.org/10.3390/su17052084>
7. Wang L. et al. Reducing Cd and Pb Accumulation in Potatoes: The Role of Soil Passivators in Contaminated Mining Soils. *Life*. 2024;14(12). <https://doi.org/10.3390/life14121615>
8. Ahmad K. et al. Evaluation of Potential Toxic Metals Accumulation in Wheat Irrigated with Wastewater. *Bull Environ Contam Toxicoll*. 2019;102(6):822–828. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02605-1>
9. Jafarova M., Vannini A., Monaci F., Loppi S. Influence of Moderate Cd and Pb Soil Pollution on Seed Development, Photosynthetic Performance and Foliar Accumulation in the Medicinal Plant *Hypericum perforatum*. *Pollutants*. 2021;1(1):1–9. <https://doi.org/10.3390/pollutants1010001>
10. Prasad M.N.V., Kiran B.R. Responses of *Ricinus communis* L. (castor bean, phytoremediation crop) seedlings to lead (Pb) toxicity in hydroponics. *Selcuk Journal of Agricultural and Food Sciences*. 2017;31(1):73–80. <https://doi.org/10.15316/sjafs.2017.9>

11. Barce J., Poschenrieder C. Plant water relations as affected by heavy metal stress: A review. 1990. <https://doi.org/10.1080/01904169009364057>
12. Ingente A.G., Anselmo C.T. Phytoremediation Potential of Kangkong (*Ipomoea Reptans* Poir) in Lead-Induced Hydroponic System. *International Journal of Research and Scientific Innovation*. 2024;XI(VII):909–921. <https://doi.org/10.51244/ijrsi.2024.1107072>
13. Khodijah N.S., Santi R., Kusmiadi R., Rismunandar I. Water Spinach (*Ipomoea reptans* Poir) Hydroponic Kratky System at Various Levels of PbSO₄ Contamination. *agriTECH*. 2024;44(4):322, Nov., <https://doi.org/10.22146/agritech.86841>
14. Bosiacki M., Kleiber T., Kaczmarek J. Evaluation of suitability of *Amaranthus caudatus* L. and *Ricinus communis* L. in phytoextraction of cadmium and lead from contaminated substrates. *Archives of Environmental Protection*. 2013;39(3):47–59. <https://doi.org/10.2478/aep-2013-0022>
15. Kim K.-R., Owens G., Naidu R., Kwon S.-I., Kim K.-H. Lead Induced Organic Acid Exudation and Citrate Enhanced Pb Uptake in Hydroponic System. *Korean Journal of Environmental Agriculture*. 2009;28(2):146–157. <https://doi.org/10.5338/kjea.2009.28.2.146>
16. Sharma P., Dubey R.S. Lead toxicity in plants. *Sociedade Brasileira de Fisiologia Vegetal*. 2005. <https://doi.org/10.1590/s1677-04202005000100004>
17. Velikova V., Yordanov I., Edreva A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants Protective role of exogenous polyamines. 2000. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/plantsci
18. White M.C., Chaney R.L., Decker A.M. Metal Complexation in Xylem Fluid' III. ELECTROPHORETIC EVIDENCE', 1981. [Online]. Available: www.plantphysiol.org
19. Banboukian A., Chen Y., Thomas V.M. The challenges of controlled environment hydroponic farming: a life cycle assessment of lettuce. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2025;30(7):1691–1704. <https://doi.org/10.1007/s11367-025-02463-6>
20. Shi M. et al. Phytochemicals, Nutrition, Metabolism, Bioavailability, and Health Benefits in Lettuce—A Comprehensive Review. *Antioxidants*. 2022;11(6). <https://doi.org/10.3390/antiox11061158>
21. Veronica B., Arshad A., Elena D., Elena Maria D. A Comprehensive Review of Lettuce Cultivation in Unconventional Systems: Pioneering Sustainable Food Production. *International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Studies*. 2025;5(4):592–598. <https://doi.org/10.62225/2583049x.2025.5.4.4650>
22. Gooding M.J., Shewry P.R. Wheat Environment, Food and Health. 2022. [Online]. Available: <https://lcn.loc.gov/2021046095>
23. Lamhamdi M. et al. Effect of lead stress on mineral content and growth of wheat (*Triticum aestivum*) and spinach (*Spinacia oleracea*) seedlings. *Saudi J Biol Sci*. 2013;20(1):29–36. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.09.001>
24. Sękara A., Jędraszczuk S.E. Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs of nine crops: Implications for phytoremediation. 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/279623631>
25. Nirmal D., Teraiya S., Patel H., Joshi P. Studies on effect of exogenous application of ascorbic acid on growth, photosynthetic pigment and oxidative defence in "groundnut" (*Arachis hypogaea* L.) under lead (Pb) stress. *Discover Plants*. 2025;2(1). <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00265-6>
26. Sofo A., Scopa A., Nuzzaci M., Vitti A. Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses. Jun. 12, 2015, MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijms160613561>
27. Malecka A., Piechalak A., Mensinger A., Hanć A., Baralkiewicz D., Tomaszewska B. Introduction Antioxidative Defense System in *Pisum sativum* Roots Exposed to Heavy Metals (Pb, Cu, Cd, Zn). 2012.
28. Nirmal D., Teraiya S., Patel H., Joshi P. Studies on effect of exogenous application of ascorbic acid on growth, photosynthetic pigment and oxidative defence in "groundnut" (*Arachis hypogaea* L.) under lead (Pb) stress. *Discover Plants*. 2025;2(1). <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00265-6>
29. Kerchev P.I., Van Breusegem F. Improving oxidative stress resilience in plants'. *Plant Journal*. 2022;109(2):359–372. <https://doi.org/10.1111/tj.15493>
30. Khan M. et al., 'Lead (Pb)-induced oxidative stress alters the morphological and physio-biochemical properties of rice (*Oryza sativa* L.). *Agronomy*. 2021;11(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy11030409>
31. Litvinskiy V.A., Grishina E.A., Nosikov V.V., Sushkova L.O. Litvinskiy V.A., Grishina E.A., Nosikov V.V., Sushkova L.O. Atomic-emission spectroscopy and microwave digestion as an integrated tool approach for determination of lead content in plants and crop production. *Plodородie*. 2018;6(105):58–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.25680/S19948603.2018.105.19> <https://elibrary.ru/ypool>
32. Holm G. Studies on chlorophyll mutations in barley: i. methods of measuring linkage by single and combined maximum-likelihood formulas, solved by use of an automatic computer and the programming language algol 60. *Hereditas*. 1966;55(1):79–120. <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1966.tb02038.x>
33. Van Wettstein D., Forschungsanstalt F. Chlorophyll-letale und der submikroskopische formwechsel der plastidenl, 1957.
34. Hans-Ulrich Bergmeyer, Methods of Enzymatic Analysis, vol. 1. Academic Press, 2012.
35. Jiang and Zhang. Kant and Turan. Abedi and Pakniyat, 2002.
36. Ikkonen E., Kaznina N. Physiological Responses of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) to Soil Contamination with Pb. *Horticulturae*. 2022;8(10). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8100951>
37. Kabata-Pendias A. Agricultural Problems Related to Excessive Trace Metal Contents of Soils.
38. Popa C., Bratu A.M., Petrus M., Bacalum M. The analysis of lead phytotoxicity in seeds using CO₂ laser photoacoustic spectroscopy. *Molecules*. 2020;25(7). <https://doi.org/10.3390/molecules25071637>
39. Khan J., Elsharkawy E., Fu Y., Jan R., Kim K.M. Melatonin alleviates lead-induced stress in rice through physiological regulation and molecular defense mechanisms. *Sci Rep*. 2025;15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18514-9>

Об авторах:

Мария Михайловна Годяева – аспирант, младший научный сотрудник ФГБНУ ФНАЦ ВИМ и географического факультета МГУ им. Ломоносова, <https://orcid.org/0000-0002-2235-450X>, IRID: 262604511, Scopus Author ID: 57208135257, S PIN-код: 9080-6677, автор-корреспондент, airune@yandex.ru

Татьяна Александровна Парамонова – кандидат биол. наук, старший преподаватель МГУ имени М.В. Ломоносова, Кафедра радиоэкологии и экотоксикологии (Факультет почвоведения), IRID: 1970010, ResearcherID: P-4569-2014, Scopus Author ID: 55337680800, <https://orcid.org/0000-0001-8179-8074>, SPIN-код: 5610-3800, tapara@yandex.ru

Артём Александрович Дорохов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, <https://orcid.org/0000-0002-7946-5729>, Scopus Author ID: 57964553900; SPIN-код: 1125-7140, dorokhov-91@yandex.ru

Мария Сергеевна Широкова – аспирант, младший научный сотрудник ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, <https://orcid.org/0000-0002-9049-1039>, SPIN-код: 1973-9717, m_shirokova98@mail.ru

About the Authors:

Maria M. Godyaeva – Postgraduate, Junior Researcher at the Federal State Budgetary Scientific Center FNAC VIM and the Geographical Faculty of Lomonosov Moscow State University, <https://orcid.org/0000-0002-2235-450X>, IRID: 262604511, Scopus Author ID: 57208135257, SPIN-code: 9080-6677, Corresponding Author, airune@yandex.ru

Tatyana A. Paramonova – Cand. Sci. (Biology), Senior Lecturer at Lomonosov Moscow State University, Department of Radioecology and Ecotoxicology (Faculty of Soil Science), IRID: 1970010, ResearcherID: P-4569-2014, Scopus Author ID: 55337680800, <https://orcid.org/0000-0001-8179-8074>, SPIN-code: 5610-3800, tapara@yandex.ru

Artem A. Dorokhov – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher at FSBI FNATS VIM, <https://orcid.org/0000-0002-7946-5729>, Scopus Author ID: 57964553900; SPIN-code: 1125-7140, dorokhov-91@yandex.ru

Maria S. Shirokova – Postgraduate, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9049-1039>, SPIN-code: 1973-9717; m_shirokova98@mail.ru