

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 632.112:633.854.78
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-020



Изменение элементного состава растений подсолнечника при воздействии засухи и тяжелых металлов

Д. Г. Федорова, Н. М. Назарова, Б. С. Укенов

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Дарья Геннадьевна Федорова, DaryaOrlova24@rambler.ru

Актуальность. Исследование имеет особое значение ввиду усиливающихся темпов мировой аридизации климата, негативно влияющей в совокупности с антропогенным воздействием на сельское хозяйство. Статья посвящена исследованию изменения элементного состава растений подсолнечника 'Посейдон 625' на фоне вариабельности фотосинтетической системы при воздействии комбинированного стресса (влияние тяжелых металлов и засухи).

Материалы и методы. Эксперимент проводили над группой контрольных образцов, выращенных при влиянии только засушливых условий, и двумя экспериментальными группами, подвергаемых дополнительному воздействию тяжелых металлов: кадмий (Cd) (концентрации: 0,384 мг/кг, 0,768 мг/кг, 1,536 мг/кг) и свинец (Pb) (концентрации: 13,04 мг/кг, 26,08 мг/кг, 52,16 мг/кг). Анализ элементного состава опытных и контрольных образцов осуществляли методом оптико-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) с использованием Agilent 7900 ICP-MS (Agilent Technologies, США).

Результаты. Сформирована база данных содержания 24 элементов в растении подсолнечника (корень, побег, семя) и в почве. Установлено значимое увеличение поглощения P, K, Ca, Mg, Fe и B растениями подсолнечника при воздействии комбинированного стресса. Отмечено значительное увеличение (в 4 раза) содержания кадмия в конечной продукции. Однако, несмотря на повышение содержания свинца в корнях и побегах подсолнечника, в его семенах превышений контрольных показателей выявлено не было.

Заключение. Установлено отрицательное действие Cd и Pb на растения подсолнечника, которое проявляется в негативном изменении элементного состава биомассы и семенного материала.

Ключевые слова: *Helianthus annuus* L. 'Посейдон 625', засуха, кадмий, свинец, коэффициент транслокации, коэффициент биологического поглощения

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10060 (<https://rscf.ru/project/23-76-10060/>).

Для цитирования: Федорова Д.Г., Назарова Н.М., Укенов Б.С. Изменение элементного состава растений подсолнечника при воздействии засухи и тяжелых металлов. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):49-61. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-020

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o20

Changes in the element composition of sunflower plants under the effect of drought and heavy metals

Darya G. Fedorova, Natalia M. Nazarova, Bulat S. Ukenov

Orenburg State University, Orenburg, Russia

Corresponding author: Darya G. Fedorova, DaryaOrlova24@rambler.ru

Background. The study is of particular importance due to the increasing pace of global climate aridification, which negatively affects agriculture in combination with anthropogenic impact. This is a case study of changes in the element composition of 'Poseidon 625' sunflower plants in the context of their photosynthetic system variability under the effect of combined stressors (heavy metals, and drought).

Materials and methods. The experiment involved a set of control samples grown under the impact of arid conditions only, and two experimental groups additionally exposed to heavy metals: Cd (conc. 0.384 mg/kg, 0.768 mg/kg, and 1.536 mg/kg) and Pb (conc. 13.04 mg/kg, 26.08 mg/kg, and 52.16 mg/kg). Experimental and control samples were analyzed for the studied element composition by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-MS) using Agilent 7900 ICP-MS (Agilent Technologies, USA).

Results. A database was created for the content of 24 elements in a sunflower plant (root, shoot and seed) and soil. A significant increase in the absorption of P, K, Ca, Mg, Fe and B by sunflower plants was recorded under the combination of both stressors. A significant increase (4 times) in the cadmium content was observed in the final product. However, despite a significant increase in the lead content in sunflower roots and shoots, no excess over the control values was detected in the seeds.

Conclusion. Cd and Pb were found to have negative effects on sunflower plants, which manifested itself in a negative change in the element composition of biomass and seed material.

Keywords: *Helianthus annuus* L. 'Poseidon 625', drought, cadmium, lead, translocation coefficient, biological absorption coefficient.

Acknowledgments: the study was funded by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-76-10060 (<https://rscf.ru/project/23-76-10060/>).

For citation: Fedorova D.G., Nazarova N.M., Ukenov B.S. Changes in the element composition of sunflower plants under the effect of drought and heavy metals. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):49-61. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o20

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Загрязнение почв потенциально токсичными элементами в настоящее время представляет серьезную экологическую угрозу и является одной из наиболее актуальных глобальных экологических проблем (Xu et al., 2019; Yan et al., 2021). Особую тревогу вызывает накопление тяжелых металлов (ТМ) в различных средах, в частности в почве и растениях как главных депонирующих компонентах антропогенно преобразованных экосистем (Keshavarzi, Kumar, 2020; Ding et al., 2022; Shaheen et al., 2023).

Загрязнение почв кадмием (Cd) и свинцом (Pb) представляет собой глобальную проблему для продовольственной безопасности из-за их широкого распространения, токсичности при низких концентрациях, стойкости и биоаккумуляции в живых организмах (Akbar et al., 2024).

Подсолнечник – однолетнее растение семейства астровых (Asteraceae), которое является основной масличной культурой в нашей стране и широко культивируется на Северном Кавказе, в Поволжье и областях Центрально-Черноземного экономического района. Среди различных сельскохозяйственных культур именно у подсолнечника определяется самое высокое поглощение кадмия в биомассе побегов (Benavides et al., 2021). Кроме этого, сорта/гибриды подсолнечника имеют различные механизмы накопления Cd, что позволяет отдельным генотипам обладать лучшей переносимостью его токсического воздействия (Fu et al., 2022). Отмечено, что загрязнение почвы свинцом снижает рост растений подсолнечника и оказывает негативное влияние на физиологические процессы и урожайность на всех уровнях свинцового стресса (Zehra et al., 2020).

Кадмий и засуха являются наиболее разрушительными из абиотических стрессов с негативными последствиями в виде нарушения метаболизма, ограничения эффективности использования питательных веществ и нарушения фотосинтеза растений. Стресс от засухи дополнительно усиливает окислительный стресс, снижая активность антиоксидантных ферментов (Adrees et al., 2020). Подобные исследования, направленные на установление зависимости степени накопления тяжелых металлов (ТМ) в условиях засухи, проводились на некоторых сельскохозяйственных культурах (Ahmed et al., 2021). Однако сведений о влиянии засухи на аккумуляцию свинца сельскохозяйственными культурами практически нет.

В литературе также отсутствуют сведения о полевых исследованиях влияния засухи на степень аккумуляции

ТМ сельскохозяйственными культурами. Ряд авторов при исследовании вопроса о снижении концентраций ТМ в растениях при засухе сходятся во мнении о необходимости проведения полевых исследований (Khan et al., 2022).

Известно, что масло подсолнечника является источником макроэлементов, таких как натрий (Na), калий (K), кальций (Ca), магний (Mg), фосфор (P), и микроэлементов, таких как железо (Fe), селен (Se), марганец (Mn), хром (Cr), цинк (Zn), алюминий (Al), барий (Ba), стронций (Sr), олово (Sn), медь (Cu), кобальт (Co) и таллий (Tl), которые необходимы или токсичны для здоровья человека при употреблении в больших количествах (Melo et al., 2019; Martinec et al., 2019). Кроме того, в пищевых растительных маслах содержатся некоторые химические элементы, такие как мышьяк (As), кадмий (Cd), никель (Ni), свинец (Pb), ртуть (Hg) и медь, которые токсичны (Astolfi et al., 2021; Farzin, Moasses, 2014) и канцерогенны для потребителей даже в малых количествах. Более того, наличие Ca, Co, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn, Sn и Ni ускоряет окисление растительных масел, влияя на их вкус, свежесть, срок хранения и токсичность (Astolfi et al., 2021). Данные об изменении элементного состава растений и конечной продукции подсолнечника под воздействием стресса от токсичных металлов и аридизации климата в литературе отсутствуют. Однако, учитывая актуальность данного вопроса, авторами была поставлена цель – оценить изменчивость элементного состава растений и семян подсолнечника при воздействии комбинированного стресса от засухи и тяжелых металлов (кадмий и свинец). В ходе проводимого исследования изменения элементного состава сопоставлялись с варьированием концентрации фотопигментов, водного баланса и содержания белка в растениях подсолнечника.

Материалы и методы

По природно-климатическим условиям Оренбургская область относится к зоне сухих степей. Почвы опытного участка представлены черноземом обыкновенным среднегумусным среднемощным тяжелосуглинистым. Влагообеспеченность почвы пониженная (менее 20%).

Исследования проводились в период вегетации 2025 г. Погодные условия характеризовались максимальной нестабильностью (табл. 1). Гидротермический коэффициент за период с апреля по сентябрь при сумме активных температур 3521,4°C в среднем равен 0,6, что определяет погодные условия, характерные для зон сухого земледелия.

Таблица 1. Климатические параметры в период проведения исследования

Table 1. Climate parameters during the period of the experiment

Месяц	Сумма эффективных температур, °C	Осадки, мм	ГТК
Апрель	293,5	21,2	0,7
Май	919,6	28,5	0,5
Июнь	1527,4	60,7	0,9
Июль	2205,8	30,5	0,4
Август	2860,6	43,4	0,7
Сентябрь	3521,4	14,3	0,2

Объектом исследования являлся сорт *Helianthus annuus* L. 'Посейдон 625'. Исследования проводили на опытном участке и в лаборатории экспериментальной ботаники ботанического сада Оренбургского государственного университета.

Посев производили в вегетационные сосуды (с предварительно восстановленным почвенным горизонтом и дренажем) вручную, с заделкой семян на глубину не более 5 см. Норма высева – 80 тыс./га с переводом значения на экспериментальный вегетационный сосуд (150 × 180 см) (около 10–12 растений в 1 сосуде).

Заложены варианты опыта в трехкратной повторности:

- контроль (посев семян в грунт без внесения токсичных металлов);
- экспериментальные группы с Cd (концентрации: 0,384 мг/кг, 0,768 мг/кг, 1,536 мг/кг);
- экспериментальные группы с Pb (концентрации: 13,04 мг/кг, 26,08 мг/кг, 52,16 мг/кг).

Вегетационные сосуды (V = 150 л) помещали вглубь почвы на уровень горизонта. Соли ацетатов металлов (Me) вводили осенью предшествующего посева года для обеспечения равномерного их распределения.

Анализ опытных и контрольных образцов на исследуемый элементный состав осуществляли методом оптико-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) с использованием Agilent 7900 ICP-MS (Agilent Technologies, США). Лабораторные исследования проводили на базе Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий РАН (ФНЦ БСТ РАН, г. Оренбург). Сбор биоматериала (побеги и корни) осуществлялся трехкратно с 5 растений за сезон вегетации подсолнечника на 30-е, 60-е и 90-е сутки развития растений. Пробы семян (250 г) отбирали при достижении их полной спелости. Биоматериал герметично упаковывали и доставляли в лабораторию экспериментальной ботаники ботанического сада, где подвергали высушиванию до постоянной массы в термостате (ТВ-80, Россия), после чего транспортировали в лабораторию ФНЦ БСТ РАН.

Коэффициент транслокации (КТ) Me рассчитывали как отношение содержания элемента в надземной части растения к его содержанию в корне, что отражает эффективность транспорта элемента в системе «корень – побег». Для оценки эффективности поглощения микроэлементов использован коэффициент биологического поглощения (КБП), представляющий собой частное от деления содержания элемента в золе растительного материала на его содержание в корнеобитаемом слое почвы (Masnair, 2003).

Влажность семян определяли стандартной методикой по ГОСТ 10856-96 (GOST 10856-96..., 2010).

Выделение и расчет содержания пигментов фотосинтеза (хлорофилл *a* и *b*, каротиноиды) осуществляли на ацетоновых экстрактах биоматериала по стандартной методике А. А. Шлыка (Shlyk, 1968).

Математическая обработка полученных данных, основанная на определении значимости отличий экспериментальных групп от контроля, степени корреляционной зависимости между исследуемыми параметрами (по Пирсону, Спирмену), проведена с использованием ПО Statistica 10.0 на уровне значимости 90–95%.

Результаты и обсуждение

Отмечена нестабильность накопления фосфора (P) подсолнечником по ходу вегетации, что связано как с фактором воздействия стресса, так и с особенностями онтогенеза культуры. Максимальное содержание P, как в побегах, так и в корнях, отмечается на первых стадиях развития растений (до возраста 30 суток), что объясняется высокой потребностью в фосфоре как стимуляторе ростовых процессов (рис. 1).

Средние значения концентрации P за период вегетации подсолнечника показывают противоположную направленность в надземной биомассе под воздействием разных металлов на фоне незначительных отличий содержания в корнях (табл. 2). При повышении Cd в субстрате содержание P в зеленой биомассе растений увеличивается; увеличение Pb снижает его содержание в побе-

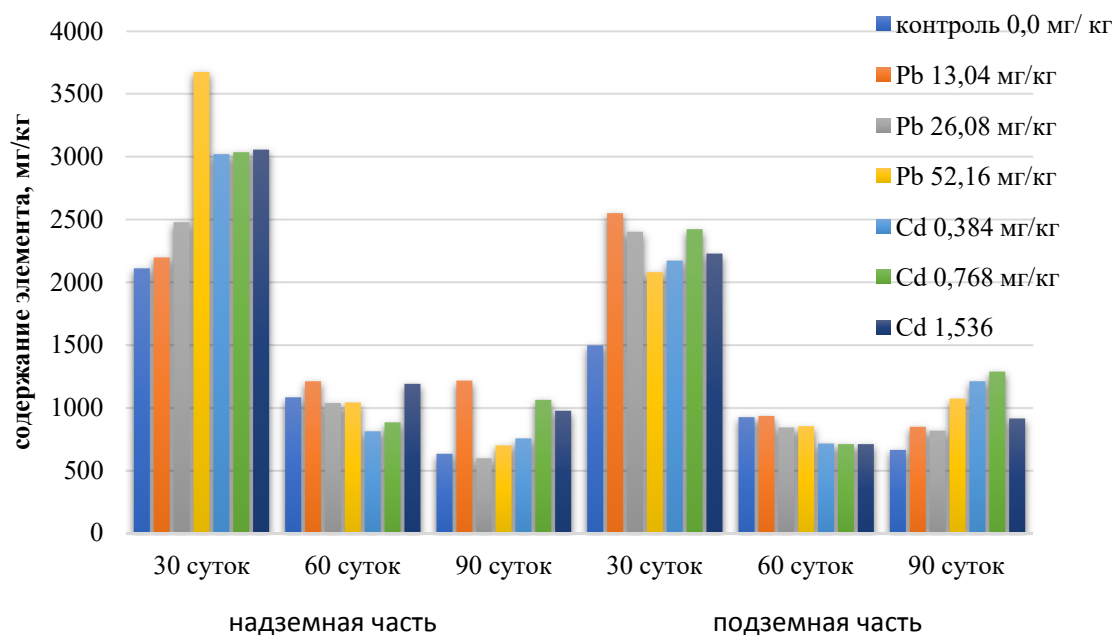


Рис. 1. Варьирование содержания фосфора в растениях подсолнечника по фазам вегетации
Fig. 1. Variation of phosphorus content in sunflower plants across the phases of plant development

Таблица 2. Референтные значения элементного состава надземной биомассы подсолнечника
Table 2. Reference values of the element composition in the aboveground sunflower biomass

Элемент	Вариант опыта						
	0,0 мг/кг	Cd 0,384 мг/кг	Cd 0,768 мг/кг	Cd 1,536 мг/кг	Pb 13,04 мг/кг	Pb 26,08 мг/кг	Pb 52,16 мг/кг
	Концентрация элемента в биомассе, мг/кг						
Cd	0,02 ± 0,001	0,08 ± 0,002	0,16 ± 0,051	0,26 ± 0,031	–	–	–
Pb	0,04 ± 0,005	–	–	–	0,18 ± 0,051	0,21 ± 0,033	0,31 ± 0,012
P	1275 ± 130,3	1530 ± 210,1	1662 ± 64,5	1743 ± 93,1	1543 ± 130,3	1373 ± 101,1	1306 ± 119,2
K	31238 ± 350,3	36158 ± 410,3	34790 ± 630,3	36853 ± 452,1	36092 ± 450,3	40206 ± 715,4	32815 ± 501,1
Ca	11931 ± 210,1	13748 ± 131,1	14237 ± 225,4	12626 ± 301,3	12407 ± 190,3	12735 ± 219,1	13785 ± 165,1
Mg	2531 ± 35,1	4002 ± 93,3	3428 ± 65,4	3501 ± 64,1	3556 ± 65,3	3401 ± 55,3	3902 ± 130,2
Na	606 ± 22,2	849 ± 65,2	899 ± 66,4	682 ± 58,4	715 ± 48,1	708 ± 74,5	857 ± 75,4
Al	613 ± 36,0	1198 ± 101,1	1412 ± 99,0	707 ± 83,3	7001 ± 65,4	744 ± 74,4	1303 ± 101,2
Mn	71 ± 11,1	72 ± 13,3	87 ± 19,1	67 ± 9,2	68 ± 13,3	68 ± 7,1	75 ± 10,1
Co	0,5 ± 0,01	0,7 ± 0,05	0,9 ± 0,09	0,5 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,5 ± 0,05	0,7 ± 0,05
Ni	5,3 ± 0,52	6,1 ± 0,94	6,1 ± 1,01	5,3 ± 0,62	5,0 ± 0,93	5,3 ± 0,51	6,1 ± 0,73
Cu	5,4 ± 0,96	5,0 ± 1,17	5,5 ± 1,11	4,8 ± 0,73	5,0 ± 0,83	5,2 ± 0,83	5,3 ± 1,13
Se	0,1 ± 0,01	0,3 ± 0,03	0,4 ± 0,03	0,3 ± 0,07	0,4 ± 0,06	0,2 ± 0,03	0,3 ± 0,04
Mo	7,1 ± 1,13	7,6 ± 0,98	7,6 ± 0,92	7,4 ± 1,24	7,6 ± 1,13	7,4 ± 0,95	7,4 ± 1,13
Cr	7,4 ± 1,23	10,0 ± 1,93	8,6 ± 2,12	5,3 ± 0,94	5,3 ± 1,11	7,5 ± 1,33	9,8 ± 2,24
Fe	481 ± 50,4	869 ± 98,2	1113 ± 1,1	530 ± 65,4	513 ± 35,8	532 ± 60,1	964 ± 65,5
Zn	27,8 ± 5,14	34,0 ± 6,11	36,0 ± 7,13	34,0 ± 7,3	34,3 ± 5,74	30,0 ± 9,13	28,2 ± 5,41
B	61,9 ± 6,32	71,1 ± 7,45	74,9 ± 10,12	75,5 ± 12,12	65,1 ± 8,93	63,4 ± 6,34	62,7 ± 7,63
Li	0,7 ± 0,09	1,1 ± 0,33	1,4 ± 0,31	0,8 ± 0,05	0,8 ± 0,05	0,7 ± 0,09	1,2 ± 0,33
Be	0,04	0,03	0,05	0,02	0,07	0,02	0,04
Br	15,3 ± 1,21	23,8 ± 1,13	16,3 ± 2,45	20,7 ± 3,84	20,7 ± 3,33	18,1 ± 2,61	20,6 ± 2,23
Sr	38,6 ± 4,52	44,3 ± 6,44	49,4 ± 6,62	46,1 ± 7,25	42,6 ± 6,41	41,1 ± 3,55	43,9 ± 7,23
I	0,39 ± 0,051	0,56 ± 0,013	0,55 ± 0,044	0,45 ± 0,011	0,47 ± 0,025	0,45 ± 0,022	0,54 ± 0,013
Ba	35,0 ± 3,12	44,1 ± 3,52	58,9 ± 6,36	39,1 ± 5,22	36,0 ± 4,25	33,3 ± 7,51	46,8 ± 6,63

гах. Однако повышение концентрации фосфора при кадмиевом стрессе в сочетании с засухой связано не только с увеличением его поглощения (достоверное увеличение КБП), а также с его накоплением вследствие нарушения аминокислотного баланса и ингибирования биосинтеза белка. Отражается это и в отрицательной корреляционной зависимости содержания фосфора и белка в биомассе подсолнечника, равной 0,9, что проявляется и в снижении запасов белка в семенах растений при избытке ТМ (табл. 3). Однако содержание фосфора в семенах остается на уровне контрольных значений при комбинации засухи и воздействия кадмия, а при минимальных концентрациях свинца даже достоверно (при $p \leq 0,05$) превосходят таковые на 13,5% (табл. 4).

Максимальные концентрации калия также отмечены под действием комбинированного стресса (как для Cd, так и Pb) на первом этапе развития подсолнечника. При этом большая часть элемента сконцентрирована в надземной биомассе; коэффициент транслокации варьирует от 1,9 до 2,2 по вариантам исследования. В течение вегетации установлено выравнивание содержания K в побегах и корнях, при значениях коэффициента транслокации от 1,0 до 1,2. На последнем этапе онтогенеза отмечено достоверное нарастание калия в побегах только под воздействием свинца (13,04 мг/кг, 26,08 мг/кг) (рис. 2). Такое повышение содержания калия в период созревания урожая приводит к более эффективному использованию воды, усиливая осморегуляцию. При этом регистри-

Таблица 3. Содержание белка в растениях подсолнечника (динамика в онтогенезе)**Table 3. Protein content in sunflower plants (dynamics in ontogenesis)**

Концентрация ТМ в почве, мг/кг	0,0	Cd 0,384	Cd 0,768	Cd 1,536	Pb 13,04	Pb 26,08	Pb 52,16
30 сут.							
Концентрация белка в растении, мг/г	3,4	0,8	0,4	3,9	1,2	2,1	2,8
60 сут.							
Концентрация белка в растении, мг/г	41,9	22,9	25,1	19,8	23,2	16,6	16,7
90 сут.							
Концентрация белка в растении, мг/г	4,1	3,2	4,4	7,4	5,9	5,7	7,9
Содержание белка в семенах, мг/кг							
	20,0	19,4	19,6	13,7	14,8	14,9	16,3

Таблица 4. Референтные значения элементного состава семян подсолнечника**Table 4. Reference values of the element composition in sunflower seeds**

Элемент	Вариант опыта						
	0,0 мг/кг	Cd 0,384 мг/кг	Cd 0,768 мг/кг	Cd 1,536 мг/кг	Pb 13,04 мг/кг	Pb 26,08 мг/кг	Pb 52,16 мг/кг
	Концентрация элемента в семенах, мг/кг						
Cd	0,013 ± 0,0092	0,03 ± 0,001	0,042 ± 0,0001	0,045 ± 0,0013	–	–	–
Pb	0,012 ± 0,0001	–	–	–	0,011 ± 0,0021	0,01 ± 0,0002	0,01 ± 0,001
P	2907 ± 148,3	2948 ± 125,4	3044 ± 121,4	2828 ± 116,1	3295 ± 156,5	3124 ± 165,4	2741 ± 144,3
K	7519 ± 374,3	6680 ± 281,1	6638 ± 325,4	7254 ± 348,1	6198 ± 279,3	6877 ± 413,3	7196 ± 309,1
Ca	1088 ± 57,4	935 ± 37,3	988 ± 32,3	1075 ± 49,1	1059 ± 46,2	1008 ± 45,4	1021 ± 41,2
Mg	1260 ± 43,3	1235 ± 43,4	1373 ± 66,1	1324 ± 65,4	1392 ± 50,2	1331 ± 43,3	1355 ± 42,1
Na	24 ± 2,0	49 ± 4,0	45 ± 3,0	50 ± 2,1	44 ± 3,3	45 ± 2,5	47 ± 3,0
Al	14,0 ± 1,91	21,0 ± 1,33	26,4 ± 1,45	23,1 ± 1,22	19,5 ± 0,82	18,2 ± 0,91	22,7 ± 0,71
Mn	11,9 ± 0,62	11,4 ± 0,55	10,7 ± 0,44	10,4 ± 0,56	11,6 ± 0,51	9,5 ± 0,53	11,2 ± 0,60
Co	0,086 ± 0,0044	0,06 ± 0,005	0,07 ± 0,005	0,08 ± 0,005	0,08 ± 0,003	0,08 ± 0,004	0,07 ± 0,004
Ni	3,01 ± 0,114	3 ± 0,1	3,2 ± 0,17	3,3 ± 0,09	2,9 ± 0,11	2,7 ± 0,22	2,9 ± 0,13
Cu	4,4 ± 0,23	3,6 ± 0,17	4,7 ± 0,21	4,4 ± 0,26	4,0 ± 0,24	3,7 ± 0,22	4,5 ± 0,22
Se	0,02 ± 0,005	0,04 ± 0,023	0,07 ± 0,005	0,08 ± 0,008	0,04 ± 0,004	0,05 ± 0,004	0,04 ± 0,003
Mo	6,9 ± 0,63	6,29 ± 0,325	6,9 ± 0,33	6,71 ± 0,71	6,5 ± 0,33	6,8 ± 0,31	7,0 ± 0,73
Cr	1,3 ± 0,041	1,1 ± 0,082	1,6 ± 0,07	2,3 ± 0,07	1,0 ± 0,05	0,7 ± 0,06	0,2 ± 0,06
Fe	30,0 ± 1,24	33,0 ± 1,42	43,6 ± 1,82	40,3 ± 1,71	31,6 ± 1,61	26,9 ± 0,92	36,8 ± 1,61
Zn	35,5 ± 1,2	38,9 ± 1,4	39,3 ± 1,25	35,4 ± 1,22	39,5 ± 1,71	35,6 ± 1,53	38,1 ± 1,11
B	13,3 ± 2,03	31,0 ± 2,76	34,4 ± 1,53	37,4 ± 1,72	36,8 ± 1,55	38,4 ± 1,81	40,6 ± 1,73
Li	0,01 ± 0,005	0,017 ± 0,0062	0,023 ± 0,0034	0,021 ± 0,0062	0,019 ± 0,0042	0,034 ± 0,0033	0,019 ± 0,0011
Be	0,0005	0,0005	0,0005	0,001	0,000	0,001	0,001
Br	2,3 ± 0,11	2,2 ± 0,15	2,2 ± 0,07	2,3 ± 0,21	1,7 ± 0,055	1,7 ± 0,053	1,8 ± 0,07
Sr	1,9 ± 0,09	1,7 ± 0,07	2,2 ± 0,11	1,8 ± 0,13	1,9 ± 0,09	1,9 ± 0,14	1,9 ± 0,11
I	0,1 ± 0,01	0,01 ± 0,004	0,09 ± 0,007	0,11 ± 0,011	0,12 ± 0,005	0,12 ± 0,013	0,11 ± 0,014
Ba	2,5 ± 0,13	2,0 ± 0,08	2,8 ± 0,16	2,5 ± 0,08	2,3 ± 0,14	2,2 ± 0,14	2,5 ± 0,13

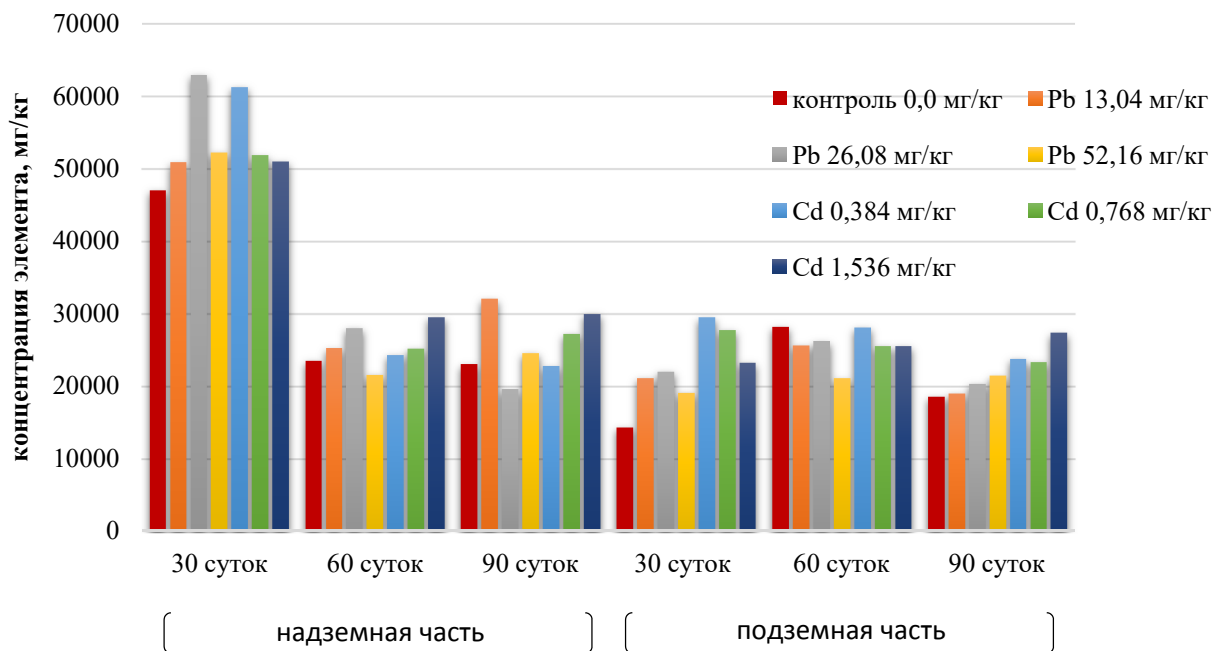


Рис. 2. Варьирование содержания калия в биомассе растений подсолнечника

Fig. 2. Variation of potassium content in the biomass of sunflower plants

руется повышение фотосинтетических пигментов, что впоследствии может повлиять на увеличение урожайности и качество зерна.

Средние значения содержания K в растениях подсолнечника показывают его увеличение в сравнении с контролем в биомассе на фоне повышенного содержания кадмия в почве. При этом числовые значения при всех исследуемых концентрациях показывают однородность (от 34 тыс. до 36 тыс. мг/кг). При комбинации свинца с засухой в концентрациях 13,04 и 26,08 мг/кг отмечено превышение средних показателей калия относительно контроля до 30%, а при максимальной концентрации Pb значения выравниваются с контрольными показателями (31–32 тыс. мг/кг) (см. табл. 3). Значительное превышение концентрации K в корнях отмечено при кадмиевом стрессе, и здесь же менее выражено снижение показателей данного элемента (табл. 5). При воздействии свинца содержание калия опускается до контрольных значений при его максимальной концентрации в субстрате. Таким образом, увеличивая запасы калия, растения подсолнечника повышают толерантность к стрессовым факторам, комплексно воздействующим на них, что позволяет им полностью завершить цикл развития.

На фоне повышенного содержания калия в биомассе отмечено его снижение в конечной продукции (см. табл. 4), что в итоге отражается на понижении влажности семян (рис. 3). Наибольшее снижение K отмечено на минимальной исследуемой концентрации свинца и равно 17,6%. Однако при увеличении концентрации стрессора отмечается хоть и незначимое, но повышение содержания калия, что имеет прямую связь ($r = 0,77$) с увеличением влажности семенного материала. Таким образом, растения подсолнечника, увеличивая запасы калия в биомассе как основного осморегулятора, пытаются противостоять стрессу от засухи, усиленному воздействием токсичных металлов.

В отличие от макроэлементов основное изменение микроэлементного состава у исследуемых растений подсолнечника отмечено в корневой системе. Однако в ди-

намике содержания цинка отмечается обратная тенденция. Так, при влиянии на растения засухи и ее одновременного сочетания с кадмием цинк в большей степени запасается в надземной части, и только ближе к окончанию онтогенеза отмечается его концентрирование в корневой системе (рис. 4). При этом КТ с 0,8 возрастает до 1,1 (табл. 6). При комбинации свинца с засухой уже в начале генеративного развития подсолнечника отмечается основное накопление цинка в корневой системе. Здесь же прослеживается прямая достоверная взаимосвязь с концентрацией Pb в биомассе корней ($r = 0,79$). Стоит отметить, что интенсивность поглощения цинка различна при сочетании с исследуемыми металлами: Cd при повышении концентрации увеличивает поглощение элемента, изменяя КБП от 52,3 до 63,5 при значении в контроле 50,3; в противоположность ему, Pb значительно снижает КБП Zn до 46 в максимальной концентрации (табл. 7), что говорит о большей биодоступности элемента в почве и меньшем его поглощении растениями данной экспериментальной группы.

Никель – микроэлемент, необходимый растениям для нормального роста, – показывает превышение над контрольными показателями в надземной биомассе при концентрации кадмия в среде 0,384 и 0,768 мг/кг, а также в максимальной концентрации свинца на 12,6% (см. табл. 3). В корневой системе экспериментальных растений отмечается снижение концентрации никеля по отношению к сравниваемым показателям. При этом под воздействием Pb различия по его концентрациям не отмечается, а вот нарастание кадмиевого стресса стремительно усиливает накопление никеля в подземной биомассе (от 26,5 мг/кг до 34,6 мг/кг) (см. табл. 5).

Выявлено увеличение содержания бора и селена в надземной биомассе – микроэлементов, играющих значимую роль в повышении устойчивости растений к стрессам (см. табл. 3, 5). Нарастание концентрации бора установлено и в корневой системе у всех экспериментальных образцов, однако данное увеличение не является значимым. Превышение контроля в пределах 15–22%

Таблица 5. Референтные значения элементного состава корней подсолнечника

Table 5. Reference values of the element composition in sunflower roots

Элемент	Вариант опыта						
	0,0 мг/кг	Cd 0,384 мг/кг	Cd 0,768 мг/кг	Cd 1,536 мг/кг	Pb 13,04 мг/кг	Pb 26,08 мг/кг	Pb 52,16 мг/кг
	Концентрация элементов в корнях, мг/кг						
Cd	0,02 ± 0,012	0,23 ± 0,013	0,43 ± 0,034	0,78 ± 0,021	–	–	–
Pb	0,29 ± 0,013	–	–	–	6,0 ± 0,93	11,6 ± 1,41	24,1 ± 1,54
P	1030 ± 65,3	1368 ± 36,4	1474 ± 48,2	1285 ± 65,4	1445 ± 113,1	1356 ± 99,1	1336 ± 87,3
K	20408 ± 213,1	27153 ± 200,2	25584 ± 153,3	25424 ± 198,2	23959 ± 123,3	22890 ± 243,1	20581 ± 276,4
Ca	4571 ± 124,1	4902 ± 290,0	5532 ± 95,3	5093 ± 115,1	5396 ± 132,3	5001 ± 65,4	5670 ± 117,1
Mg	2171 ± 113,3	2067 ± 267,1	2362 ± 254,2	2424 ± 197,2	2477 ± 205,1	2228 ± 178,1	2163 ± 169,2
Na	7567 ± 212,2	8304 ± 256,3	9009 ± 302,3	8149 ± 326,3	9352 ± 299,1	9815 ± 264,1	9159 ± 213,3
Al	6194 ± 165,1	4324 ± 315,2	5646 ± 265,1	6638 ± 325,3	6895 ± 323,4	7205 ± 258,2	7554 ± 257,3
Mn	257 ± 35,3	179 ± 22,4	191 ± 47,3	205 ± 33,3	248 ± 25,4	247 ± 17,1	312 ± 65,1
Co	6,0 ± 1,12	4,0 ± 1,22	4,2 ± 0,93	4,7 ± 1,31	5,62 ± 1,33	5,4 ± 1,52	6,9 ± 2,01
Ni	54,7 ± 11,12	26,5 ± 9,34	30,6 ± 10,11	34,6 ± 12,34	37,5 ± 9,51	33,8 ± 11,23	36,0 ± 12,61
Cu	12,6 ± 2,41	11,6 ± 2,51	17,0 ± 1,91	17,9 ± 2,13	13,1 ± 3,12	13,5 ± 2,62	15,2 ± 2,12
Se	0,6 ± 0,01	0,8 ± 0,02	0,8 ± 0,04	0,9 ± 0,01	0,6 ± 0,02	0,6 ± 0,02	0,7 ± 0,07
Mo	7,7 ± 1,71	7,4 ± 1,12	7,9 ± 1,13	7,9 ± 1,61	7,7 ± 0,92	7,7 ± 1,71	7,9 ± 2,12
Cr	84,3 ± 15,11	51,4 ± 13,13	66,2 ± 9,91	78,1 ± 8,32	69,7 ± 6,34	66,7 ± 7,24	84,4 ± 8,13
Fe	8048 ± 115,1	8014 ± 123,1	7252 ± 213,3	9892 ± 356,4	5101 ± 227,3	5636 ± 299,1	7257 ± 450,1
Zn	31,6 ± 8,93	31,2 ± 6,31	32,9 ± 6,54	31,9 ± 6,68	34,0 ± 8,35	32,9 ± 3,13	37,6 ± 4,83
B	28,8 ± 7,72	33,9 ± 6,73	35,5 ± 5,62	34,9 ± 6,60	30,5 ± 7,10	33,0 ± 5,12	32,5 ± 3,17
Li	5,1 ± 1,03	3,5 ± 1,23	4,2 ± 0,91	4,6 ± 1,13	5,3 ± 1,23	5,1 ± 1,34	6,8 ± 1,61
Be	0,36 ± 0,022	0,26 ± 0,052	0,29 ± 0,042	0,33 ± 0,031	0,37 ± 0,025	0,37 ± 0,034	0,46 ± 0,051
Br	14,0 ± 3,50	16,8 ± 3,62	17,3 ± 1,53	17,3 ± 2,48	18,2 ± 2,34	18,3 ± 4,55	14,9 ± 3,25
Sr	40,7 ± 12,34	42,8 ± 10,31	49,7 ± 8,91	45,4 ± 7,91	49,2 ± 11,22	44,8 ± 13,13	49,9 ± 12,11
I	1,67 ± 0,553	1,29 ± 0,601	1,19 ± 0,606	1,40 ± 0,354	2,00 ± 0,1105	1,92 ± 0,535	1,58 ± 0,432
Ba	173,3 ± 33,03	173,3 ± 35,01	177,5 ± 32,33	180,5 ± 45,13	195,0 ± 35,45	186,5 ± 25,4	207,3 ± 45,17

по содержанию элемента в побегах установлено при воздействии избытка Cd. В этой же экспериментальной группе наибольшее нарастание концентрации бора в биомассе установлено в конце вегетации, что, вероятнее всего, связано с физиологическим старением и усилением состояния перенапряжения растительного организма. Под негативным воздействием свинца значения содержания бора в биомассе не показывают значимых отличий от контрольных показателей.

Известно, что селен (Se) способен повысить устойчивость растений к неблагоприятным факторам окружающей среды за счет активизации антиоксидантной системы, стимулирования фотосинтетического потенциала, накопления белков и моносахаров, что впоследствии увеличит урожайность культурных растений, а также качество получаемой продукции. Установлено значимое повышение уровня селена в побегах и корнях под-

солнечника при повышенном содержании Cd в среде (см. табл. 3, 5). При воздействии повышенных концентраций Pb отмечено увеличение содержания Se в побегах. Максимальное содержание элемента (0,35 мг/кг) наблюдали при концентрации Pb 13,04 мг/кг, что показывает превышение контроля в 2,5 раза. Прямая зависимость (для Cd $r = 0,85$; для Pb $r = 0,88$) установлена между накоплением Se в побегах и корнях подсолнечника. В подземной части растений установлено наибольшее превышение (в 1,6 раза) содержания элемента под воздействием максимальной концентрации Cd. При влиянии Pb содержание Se в корнях подсолнечника увеличивается относительно контроля, однако отличия не являются статистически значимыми. В связи с усиленным запасанием элемента в биомассе растений содержание его подвижной формы в почве под воздействием комбинации стрессоров пропорционально снижается, что проявляется

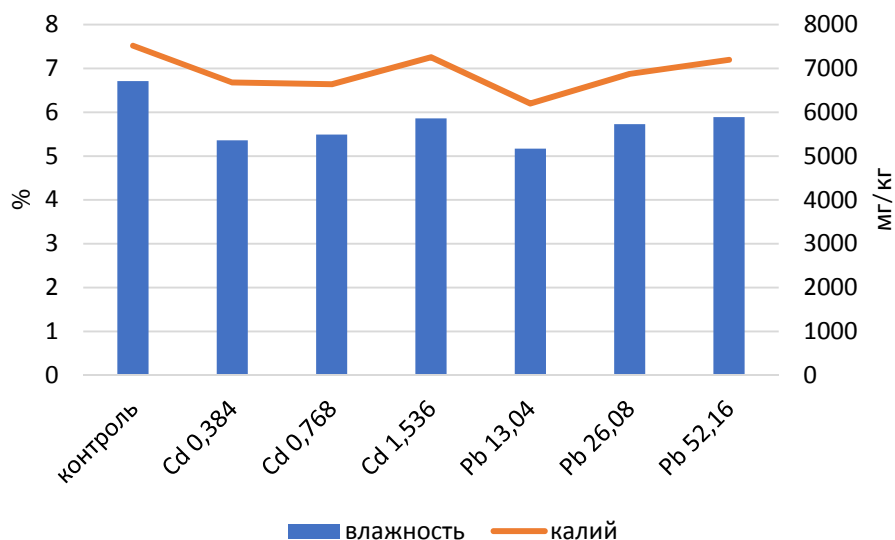


Рис. 3. Содержание калия и влажность семян подсолнечника
Fig. 3. Potassium content and moisture content in sunflower seeds

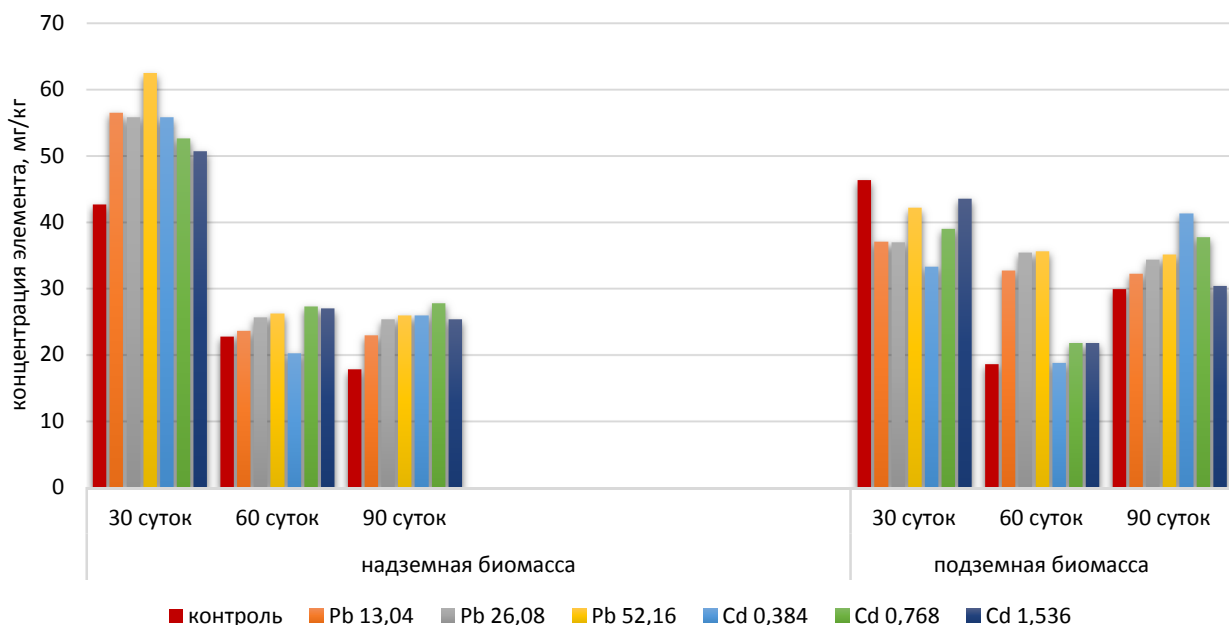


Рис. 4. Варьирование содержания цинка в биомассе растений подсолнечника
Fig. 4. Variation of zinc content in the biomass of sunflower plants

в значениях коэффициента корреляции ($r = -0,81$). При этом степень доступности элемента снижается, что отражается на снижении КБП с 0,5 в контроле до 0,09 под влиянием Cd и 0,2 для Pb (см. табл. 7).

Значительное увеличение содержания Se при действии повышенных концентраций Cd в середине вегетационного цикла (рис. 5) положительно коррелирует ($r = 0,85-0,89$) с накоплением фотосинтетических пигментов (Хл *a*, *b*, Хл *a + b*), что может быть связано с повышением фотохимической активности хлоропластов под влиянием элемента (табл. 8). Аналогичная взаимосвязь ($r = 0,82$) установлена между концентрацией Se в побегах растений и количеством фотосинтетических пигментов (Хл *a*) при токсичном влиянии Pb на заключительных этапах онтогенеза подсолнечника.

Оценка средних значений КТ элементного состава (см. табл. 6) показала, что в целом закономерности рас-

пределения элементов в растениях (побег/корень) в экспериментальных группах схожи с контролем, за некоторыми исключениями. Так, накопление растениями подсолнечника фосфора при повышении концентрации Pb в почве сдвигается в сторону подземной части на фоне постепенного снижения КТ. Zn в контроле концентрируется в большей степени в корневой системе, а под избыточным влиянием Cd (при всех концентрациях) его накопление превалирует в надземной части (при стабильном КТ, равном 1,1 против 0,8 в контроле).

Расчитанный КБП (см. табл. 7) показывает значимое (при $p \leq 0,05$) увеличение поглощения P, K, Ca, Mg, Fe и V под воздействием ТМ. При этом степень их поглощения увеличивается пропорционально повышению концентрации токсиканта в почве на фоне снижения биодоступности элемента. Максимальное увеличение КБП (в 4,5 раза) Fe отмечено при концентрации Cd 0,768 мг/кг,

Таблица 6. Значения коэффициента транслокации (КТ) при различном уровне стресса**Table 6. Values of the translocation coefficient at different stress levels**

Элемент	Вариант опыта						
	0,0 мг/кг	Cd 0,384 мг/кг	Cd 0,768 мг/кг	Cd 1,536 мг/кг	Pb 13,04 мг/кг	Pb 26,08 мг/кг	Pb 52,16 мг/кг
	КТ						
P	1,24	1,12	1,13	1,36	1,1	1	0,98
K	1,53	1,33	1,36	1,45	1,51	1,76	1,59
Ca	2,61	2,8	2,57	2,48	2,3	2,55	2,43
Mg	1,17	1,94	1,45	1,44	1,44	1,53	1,8
Na	0,08	0,1	0,1	0,08	0,08	0,07	0,09
Al	0,1	0,28	0,25	0,11	0,1	0,1	0,17
Mn	0,28	0,4	0,46	0,33	0,27	0,27	0,24
Co	0,08	0,19	0,22	0,11	0,08	0,1	0,1
Ni	0,1	0,23	0,2	0,15	0,13	0,16	0,17
Cu	0,43	0,43	0,32	0,27	0,38	0,38	0,35
Se	0,25	0,41	0,56	0,33	0,56	0,42	0,45
Mo	0,92	1,02	0,96	0,95	0,98	0,96	0,94
Cr	0,09	0,19	0,13	0,07	0,08	0,11	0,12
Fe	0,06	0,11	0,15	0,05	0,1	0,09	0,13
Zn	0,8	1,1	1,1	1,1	1,01	0,91	0,75
B	2,15	2,1	2,11	2,16	2,13	1,92	1,93

Таблица 7. Значения коэффициента биологического поглощения (КБП) для анализируемых элементов при различном уровне металлического стресса**Table 7. Values of the biological absorption coefficient for the analyzed elements at different levels of metal stress**

Элемент	Вариант опыта						
	0,0 мг/кг	Cd 0,384 мг/кг	Cd 0,768 мг/кг	Cd 1,536 мг/кг	Pb 13,04 мг/кг	Pb 26,08 мг/кг	Pb 52,16 мг/кг
	КБП						
P	29,66	60,5	72,3	81,8	45,8	60,5	75,5
K	67,9	89,2	88,1	89,6	82	111,9	87,7
Ca	1,77	2,8	2,9	2,4	2,4	2,4	2,7
Mg	3,12	5,42	4,7	4,64	4,39	4,5	5,3
Na	3,5	4,5	4,8	4	3,6	3,5	4,6
Al	20,5	49,1	56	25,9	22,7	25,6	39,7
Mn	1,3	0,8	1,1	0,8	0,7	0,8	1,3
Co	3,6	3,3	3,4	2,8	2,1	2,8	3,9
Ni	9,6	12	12,2	10,6	7,8	8,8	11,4
Cu	51,9	48,5	33,2	30,2	38,6	44,2	46,5
Se	0,7	7,33	7,5	4,8	6,5	5,9	6,1
Cr	41,3	69,7	59,9	31,8	28,1	44,2	54,2
Fe	212,7	653,2	942,8	342,13	335,2	281,3	555,2
Zn	50,6	52,3	63	62,5	56,2	51,7	46
B	34,4	72,6	74,8	75,5	54,3	62,8	62,7

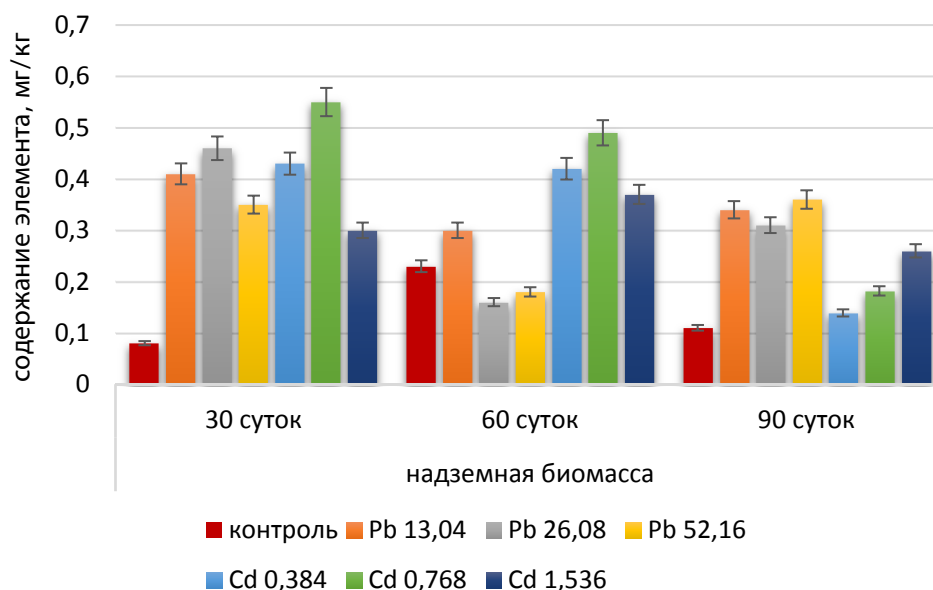


Рис. 5. Динамика накопления селена в надземной части растений подсолнечника
Fig. 5. Dynamics of selenium accumulation in the aboveground sunflower biomass

Таблица 8. Содержание фотосинтетических пигментов в растениях подсолнечника
Table 8. The content of photosynthetic pigments in sunflower plants

Концентрация ТМ в почве, мг/кг	0,0	Cd 0,384	Cd 0,768	Cd 1,536	Pb 13,04	Pb 26,08	Pb 52,16
	30 сут.						
Хл a	9,2 ± 1,7	5,6 ± 0,1	3,0 ± 0,5	3,7 ± 0,5	4,6 ± 0,7	3,3 ± 0,7	4,3 ± 0,5
Хл b	3,2 ± 0,5	2,1 ± 0,1	1,1 ± 0,1	1,5 ± 0,6	1,7 ± 0,4	1,2 ± 0,3	1,7 ± 0,3
Хл a + b	5,5 ± 0,8	3,3 ± 0,6	1,9 ± 0,3	2,3 ± 0,6	2,9 ± 0,5	2,0 ± 0,2	2,6 ± 0,1
Кар	0,3 ± 0,09	0,2 ± 0,06	0,1 ± 0,03	0,1 ± 0,05	0,2 ± 0,08	0,1 ± 0,03	0,1 ± 0,02
60 сут.							
Хл a	11,6 ± 1,5	14,6 ± 2,3	16,6 ± 3,4	10,5 ± 2,0	11,6 ± 1,6	15,5 ± 2,6	11,2 ± 2,3
Хл b	4,5 ± 0,5	5,8 ± 1,1	6,1 ± 1,3	3,6 ± 1,1	4,3 ± 0,9	5,7 ± 1,4	3,5 ± 1,0
Хл a + b	7,4 ± 1,0	9,4 ± 2,1	10,2 ± 1,5	6,3 ± 1,7	7,2 ± 1,0	9,6 ± 2,0	6,5 ± 1,6
Кар	0,4 ± 0,05	0,5 ± 0,06	0,5 ± 0,08	0,4 ± 0,05	0,4 ± 0,04	0,6 ± 0,07	0,4 ± 0,09
90 сут.							
Хл a	7,2 ± 1,3	13,3 ± 1,9	8,2 ± 2,1	5,5 ± 0,6	8,3 ± 1,3	5,8 ± 0,6	6,9 ± 1,0
Хл b	2,7 ± 0,5	5,0 ± 1,0	2,6 ± 0,5	1,6 ± 0,2	3,0 ± 0,8	1,8 ± 0,2	2,4 ± 0,4
Хл a + b	4,4 ± 0,9	8,3 ± 2,1	5,0 ± 0,7	3,2 ± 0,4	5,1 ± 0,6	3,5 ± 0,5	4,2 ± 0,6
Кар	0,3 ± 0,05	0,5 ± 0,08	0,3 ± 0,05	0,2 ± 0,04	0,3 ± 0,04	0,3 ± 0,08	0,3 ± 0,03

Р (в 2,8 раза) и В (в 2,2 раза) – при максимальной концентрации Cd 1,536 мг/кг. Обратная тенденция отмечена для Сu. При воздействии Cd КБП Сu снижается в прямой зависимости от количества ТМ в почве; при свинцовом стрессе наблюдается линейное повышение коэффициента, однако значения остаются ниже контрольных. Самые высокие значения КБП характерны для Fe, что находит

прямое отражение в повышении активности фотосинтетических пигментов. Коэффициент корреляции между КБП Fe и концентрацией Хл a + b положительный и устанавливается на уровне от 0,72 до 0,95 по вариантам эксперимента. Прямая взаимосвязь установлена и между фотопигментами и биологическим поглощением селена подсолнечником на фоне повышенных концентраций

токсичных металлов: под воздействием кадмия коэффициент корреляции варьирует от 0,83 до 0,88, при воздействии свинца – $r = 0,99$.

Вследствие высокого осмотического стресса и ионного дисбаланса в конечной продукции (семенах) отмечается высокое содержание натрия Na (превышение контроля в 2 раза) (см. табл. 4), препятствующего поглощению воды, что в итоге негативно отражается на влажности семян.

Se в семенах показывает значимое увеличение, повторяя тенденцию его накопления в побегах и корневой системе. Больше увеличение (в 4 раза) отмечено при воздействии Cd на максимальной исследуемой концентрации, при свинцовом стрессе – в 2,4 раза при концентрации 26,08 мг/кг (см. табл. 4). Так как основная биохимическая функция Se – участие в построении антиоксидантного фермента и защита организма от действия свободных радикалов, по увеличению его концентрации можно констатировать степень повышающейся напряженности растительного организма.

При изучении влияния тяжелых металлов установлен эффект гипераккумуляции Cd в надземной биомассе (КТ в пределах от 1,1 до 2,0 по вариантам опыта) на стадии активного роста (см. табл. 6). Происходит это на фоне усиленного поглощения Cd из почвы при КБП 10,6–11,6 для концентраций 0,384 мг/кг и 0,768 мг/кг. При этом максимальный КБП отмечен в период созревания урожая (от 11,1 до 23,0). Pb в большей степени аккумулируется в корнях подсолнечника, где его концентрация превышает значения содержания его в побегах от 2,5 до 120 раз (см. табл. 3, 5), что в первую очередь свидетельствует о барьерной функции корней, блокирующих поступление и аккумуляцию Pb в надземной биомассе.

Анализ КТ и КПБ показывает избыточное накопление Cd растениями подсолнечника, а большая его подвижность в растительном организме находит прямое отражение в его избыточном накоплении в семенах (см. табл. 4). Превышений концентраций Pb в семенном материале подсолнечника, как и в контроле, не выявлено. В данном случае показатели проявляют однородность и устанавливаются на уровне контрольных (см. табл. 4).

Содержание Cd в семенах достоверно нарастает и уже при минимальной исследуемой концентрации превышает контрольные значения в 2,3 раза, а на максимальной – в 4 раза (см. табл. 4). Установленная закономерность повышения концентрации Cd в семенах подсолнечника на 0,01 мг с каждым последующим увеличением концентрации металла в почве (в 2 раза по сравнению с предыдущей концентрацией) позволяет определить почвенную концентрацию кадмия (для условий места исследования), равную 49,12 мг/кг, при которой содержание кадмия в семенах подсолнечника достигнет установленного ПДК – 0,1 мг/кг.

Выводы

В ходе проведенного исследования установлено отрицательное действие Cd и Pb на растения подсолнечника сорта 'Посейдон 625', которое проявляется в негативном изменении элементного состава биомассы и семенного материала.

Установлено значимое увеличение поглощения P, K, Ca, Mg, Fe и B растениями подсолнечника, при этом степень их поглощения увеличивается пропорционально повышению концентрации ТМ в почве. Снижение КБП и повышение доступного содержания элемента в почве

отмечено для Cu. Наиболее высокие значения КБП характерны для Fe, что находит прямое отражение в повышении активности фотопигментов. Вследствие высокого осмотического стресса и ионного дисбаланса в семенах отмечается снижение K и высокое содержание Na, что отражается на снижении влажности семян. Se в семенах показывает значимое увеличение, повторяя тенденцию накопления в побегах и корневой системе.

Выявлен эффект гипераккумуляции Cd в побегах подсолнечника в фазе вегетативного роста. Pb в большей степени аккумулируется в подземной части растений, превышая содержание его в побегах от 2,5 до 120 раз. При этом превышений Pb в семенах не выявлено. Содержание Cd в семенах достоверно нарастает и уже при минимальной исследуемой концентрации ТМ превышает контроль в 2,3 раза, а на максимальной – в 4 раза.

Проведенные исследования позволили выявить почвенную концентрацию Cd (для местного климата) в 49,12 мг/кг, при которой содержание данного металла в семенах достигнет установленного предела допустимой концентрации (0,1 мг/кг).

References / Литература

- Adrees M., Khan Z.S., Ali S., Hafeez M., Khalid S., Ur Rehman M.Z. et al. Simultaneous mitigation of cadmium and drought stress in wheat by soil application of iron nanoparticles. *Chemosphere*. 2020;238:12468. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124681
- Ahmed T., Noman M., Manzoor N., Shahid M., Abdullah M., Ali L. et al. Nanoparticle-based amelioration of drought stress and cadmium toxicity in rice via triggering the stress responsive genetic mechanisms and nutrient acquisition. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;209:111829. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111829
- Akbar W.A., Ur Rahim H., Irfan M., Sehrish A.K., Mudassir M. Assessment of heavy metal distribution and bioaccumulation in soil and plants near coal mining areas: implications for environmental pollution and health risks. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2024;196(1):97. DOI: 10.1007/s10661-023-12258-7
- Astolfi M.L., Marini F., Frezzini M.A., Massimi L., Capriotti A.L., Montone C.M. et al. Multielement characterization and antioxidant activity of Italian extra-virgin olive oils. *Frontiers in Chemistry*. 2021;9:769620. DOI: 10.3389/fchem.2021.769620
- Benavides B.J., Drohan P.J., Spargo J.T., Maximova S.N., Gultinan M.J., Miller D.A. Cadmium phytoextraction by *Helianthus annuus* (sunflower), *Brassica napus* cv Wichita (rapeseed), and *Chrysopsis zizanioides* (vetiver). *Chemosphere*. 2021;265:129086. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129086
- Ding C., Chen J., Zhu F., Chai L., Lin Z., Zhang K. Et al. Biological toxicity of heavy metal(loid)s in natural environments: from microbes to humans. *Frontiers in Environmental Science*. 2022;10:920957. DOI: 10.3389/fenvs.2022.920957
- Farzin L., Moassesi M.E. Determination of metal contents in edible vegetable oils produced in Iran using microwave-assisted acid digestion. *Quarterly Journal of Applied Chemical Research*. 2014;8(3):35-43.
- Fu Y., Zhatova H., Li Y., Liu Q., Trotsenko V., Li C. Physiological and transcriptomic comparison of two sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars with high/low cadmium accumulation. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:854386. DOI: 10.3389/fpls.2022.854386

- GOST 10856-96. Interstate standard. Oil seeds. Method for determination of moisture content. Moscow: Standartinform; 2010. [in Russian] (ГОСТ 10856-96. Межгосударственный стандарт. Семена масличные. Метод определения влажности. Москва: Стандартинформ; 2010). URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/382/38247.pdf> [дата обращения: 21.05.2025].
- Keshavarzi A., Kumar V. Spatial distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in agricultural soils of Northeastern Iran. *Geology, Ecology, and Landscapes*. 2020;4(2):87-103. DOI: 10.1080/24749508.2019.1587588
- Khan Z., Fan X., Khan M.N., Khan M.A., Zhang K., Fu Y. et al. The toxicity of heavy metals and plant signaling facilitated by biochar application: Implications for stress mitigation and crop production. *Chemosphere*. 2022;308(Pt 3):136466. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136466
- Macnair M.R. The hyperaccumulation of metals by plants. *Advances in Botanical Research*. 2003;40:63-105. DOI: 10.1016/S0065-2296(05)40002-6
- Martinec N., Balbino S., Dobša J., Šimunić-Mežnarić V., Legen S. Macro- and microelements in pumpkin seed oils: Effect of processing, crop season, and country of origin. *Food Science and Nutrition*. 2019;7(5):1634-1644. DOI: 10.1002/fsn3.995
- Melo M., Michel F., Arakaki D., Lima N., Gonçalves D., Cavaleiro L. et al. First study on the oxidative stability and elemental analysis of Babassu (*Attalea speciosa*) edible oil produced in Brazil using a domestic extraction machine. *Molecules*. 2019;24(23):4235. DOI: 10.3390/molecules24234235
- Shaheen S.M., Mosa A., Natasha, Jeyasundar P.G.S.A., Hassan N.E.E., Yang X. et al. Pros and cons of biochar to soil potentially toxic element mobilization and phytoavailability: Environmental implications. *Earth Systems and Environment*. 2023;7(1):321-345. DOI: 10.1007/s41748-022-00336-8
- Shlyk A.A. On spectrophotometric determination of chlorophylls *a* and *b*. *Biochemistry (Moscow)*. 1968;33(2):275-285. [in Russian] (Шлык А.А. О спектрофотометрическом определении хлорофиллов *a* и *b*. *Биохимия*. 1968;33(2):275-285).
- Xu J., Liu C., Hsu P.C., Zhao J., Wu T., Tang J. Et al. Remediation of heavy metal contaminated soil by asymmetrical alternating current electrochemistry. *Nature Communications*. 2019;10(1):2440. DOI: 10.1038/s41467-019-10472-x
- Yan Y., Sun Q., Yang J., Zhang X., Guo B. Source attributions of Cadmium contamination in rice grains by Cadmium isotope composition analysis: A field study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;210:111865. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111865
- Zehra A., Sahito Z.A., Tong W., Tang L., Hamid Y., Bilal Khan M. et al. Assessment of sunflower germplasm for phytoremediation of lead-polluted soil and production of seed oil and seed meal for human and animal consumption. *Journal of Environmental Sciences (China)*. 2020;87:24-38. DOI: 10.1016/j.jes.2019.05.031

Информация об авторах

Дарья Геннадьевна Федорова, кандидат биологических наук, директор ботанического сада, Оренбургский государственный университет, 460018 Россия, Оренбург, пр. Победы, 13, DaryaOrlova24@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5323-4965>

Наталья Михайловна Назарова, кандидат биологических наук, руководитель научной группы, Оренбургский государственный университет, 460018 Россия, Оренбург, пр. Победы, 13, Nazarova-1989@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7449-0378>

Булат Сирикбаевич Укенов, кандидат биологических наук, доцент, Оренбургский государственный университет, 460018 Россия, Оренбург, пр. Победы, 13, 89198660945@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1407-441X>

Information about the authors

Darya G. Fedorova, Cand. Sci. (Biology), Director of the Botanical Garden, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave., Orenburg 460018, Russia, DaryaOrlova24@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5323-4965>

Natalia M. Nazarova, Cand. Sci. (Biology), Head of a Scientific Team, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave., Orenburg 460018, Russia, Nazarova-1989@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7449-0378>

Bulat S. Ukenov, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave., Orenburg 460018, Russia, 89198660945@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1407-441X>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.07.2025; одобрена после рецензирования 11.11.2025; принята к публикации 09.02.2026. The article was submitted on 28.07.2025; approved after reviewing on 11.11.2025; accepted for publication on 09.02.2026.