УДК: 633.18:631.416:581.192

БИОАККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СТЕБЛЯХ СОРТОВ РИСА (ORYZA SATIVA L.)

Нурметов Нурали Артик угли
Хорезмское областное региональное отделение Института почвоведения и агрохимических исследований, заместитель директора
e-mail: nurali.na@mail.ru
https://orcid.org/0009-0004-1423-1325
Хусниддин Каримов Нагимович
старший научный сотрудник
xkarimov1976@gmail.ru
https://orcid.org/0000-0003-1060-808X
Научно-исследовательский институт садоводства виноградарства и виноделия имени академика Махмуда Мирзаева

Аннотация: *В данной работе изучена биоаккумуляция тяжелых металлов (Cd, Cr, Co, Zn, Ni, Pb и Cu) в стебле и листьях сортов риса «Alanga» и «Lazurniy», выращенных на орошаемых почвах, искусственно загрязненных тяжелыми металлами в концентрациях, превышающих ПДК в 3 и 5 раз, а также при комплексном загрязнении. Результаты трехлетних (2021-2023 гг.) вегетационных опытов показали, что с увеличением уровня загрязнения возрастает накопление тяжелых металлов в надземных органах растений. Максимальное содержание хрома, цинка, свинца и меди отмечено в вариантах с пятикратным и комплексным загрязнением. Сорт Lazurniy характеризовался более высокой способностью к накоплению указанных элементов по сравнению с сортом Alanga. Кадмий интенсивно аккумулировался у обоих сортов, тогда как накопление никеля в надземных органах было ограниченным. Полученные результаты подтверждают зависимость биоаккумуляции тяжелых металлов от уровня загрязнения почвы и биологических особенностей сорта, а также обосновывают перспективность использования риса в технологиях фиторемедиации.*

Ключевые слова: *рис, тяжелые металлы, биоаккумуляция, фиторемедиация, кадмий, хром, цинк, свинец, медь.*

Abstract: *This study evaluated the bioaccumulation of heavy metals (Cd, Cr, Co, Zn, Ni, Pb, and Cu) in the stem and leaf tissues of Alanga and Lazurniy rice cultivars*

grown on irrigated soils artificially contaminated with heavy metals at 3- and 5-fold maximum permissible concentrations (MPC), as well as under combined contamination. The results of three-year vegetation experiments (2021-2023) demonstrated that increasing heavy metal concentrations significantly enhanced their accumulation in the aboveground organs of rice plants. The highest concentrations of chromium, zinc, lead, and copper were recorded under fivefold MPC and combined contamination treatments. The Lazurniy cultivar exhibited a greater capacity to accumulate these elements than the Alanga cultivar. Cadmium showed relatively high bioaccumulation in both cultivars, whereas nickel accumulation in the aboveground tissues remained limited. The findings indicate that heavy metal bioaccumulation depends on both the contamination level of the soil and cultivar-specific characteristics, supporting the potential application of rice cultivars in phytoremediation of heavy metal-contaminated soils.

Keywords: *rice, heavy metals, bioaccumulation, phytoremediation, cadmium, chromium, zinc, lead, copper.*

Введение.

В настоящее время загрязнение почв тяжелыми металлами вследствие чрезмерного применения минеральных удобрений и химических средств в сельском хозяйстве, а также воздействия техногенных факторов является одной из глобальных экологических проблем [4]. Длительное сохранение тяжелых металлов в почве, их поглощение растениями и последующее поступление в организм человека по пищевой цепи представляют серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья населения. В связи с этим оценка экологического состояния загрязненных почв, изучение особенностей биоаккумуляции тяжелых металлов растениями и разработка мер по снижению их негативного воздействия приобретают особую научную и практическую значимость [3; 5].

В Республике Узбекистан охрана почвенных ресурсов и их рациональное использование являются одним из приоритетных направлений государственной политики. В частности, в пункте 54 Приложения 2 к Указу Президента Республики Узбекистан № ПФ-37 от 21 февраля 2024 года «О дополнительных мерах по охране почвенных ресурсов и повышению их плодородия в 2024-2026 годах» предусмотрена разработка рекомендаций для землепользователей по вопросам загрязнения почв химическими веществами [1]. Реализация данной задачи повышает актуальность исследований, направленных на оценку почв, загрязнённых тяжёлыми металлами, изучение закономерностей их поступления и накопления в растениях, а также разработку научно обоснованных рекомендаций по снижению негативного воздействия загрязнения.

Рис (Oryza sativa L.) является одной из важнейших продовольственных культур в мире. В связи с выращиванием в условиях затопления он обладает более высокой способностью к поглощению тяжелых металлов по сравнению с другими зерновыми культурами. В этой связи определение уровня биоаккумуляции различных тяжелых металлов в стеблевых и листовых органах растений риса, оценка сортовых различий, а также научное обоснование их потенциала для фиторемедиации имеют важное научное и практическое значение.

Целью настоящего исследования являлась оценка особенностей биоаккумуляции Cd, Cr, Co, Zn, Ni, Pb и Cu в стеблевых и листовых органах сортов риса Alanga и Lazurniy, выращенных на орошаемых почвах, искусственно загрязнённых тяжелыми металлами различной степени, а также определение влияния уровня загрязнения и сортовых особенностей на накопление этих элементов.

Материалы и методы.

Исследования проводились на сортах риса Alanga и Lazurniy, выращенных на орошаемых почвах, искусственно загрязнённых тяжёлыми металлами (Cd, Cr, Co, Zn, Ni, Pb и Cu) в концентрациях, превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК) в 3 и 5 раз, а также при комплексном загрязнении. Для анализа использовали объединённые образцы стеблей и листьев растений. Содержание тяжёлых металлов определяли в пересчёте на сухое вещество. Анализы выполняли на оптическом эмиссионном спектрометре AVIO 200 Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) в соответствии с методическими указаниями «Методические указания по определению тяжёлых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства» (1992). Полученные результаты были обработаны с использованием методов математической статистики, после чего проведена оценка закономерностей биоаккумуляции тяжёлых металлов в стеблевых и листовых органах растений риса [2].

Результаты исследований и их обсуждение.

В течение трёх вегетационных сезонов в контрольном варианте содержание хрома в стеблевых и листовых органах составило 3,92 мг/кг у сорта Alanga и 4,43 мг/кг у сорта Lazurniy. В вариантах с загрязнением хромом, превышающим предельно допустимую концентрацию (ПДК) в 3 и 5 раз, а также при комплексном загрязнении, накопление данного элемента существенно увеличивалось. Наибольшее содержание хрома у сорта Alanga отмечено в 6-м варианте и составило 11,64-13,68 мг/кг, тогда как у сорта Lazurniy этот показатель достигал 14,02-12,69-11,86 мг/кг. В вариантах с трёхкратным превышением ПДК содержание хрома в стеблевых и листовых органах сорта

Alanga варьировало в пределах 6,34-9,54 мг/кг, а у сорта Lazurniy - 7,98-9,88 мг/кг. Полученные результаты свидетельствуют о том, что во всех вариантах опыта накопление хрома в стеблевых и листовых органах было выше у сорта Lazurniy, чем у сорта Alanga.

В ходе исследований установлено, что биоаккумуляция меди в стеблевых органах различалась в зависимости от сорта и года исследований. В 2021 году содержание меди у сорта Lazurniy было выше, чем у сорта Alanga, на 1,16-1,36 мг/кг, а в 2023 году - на 0,33-0,51 мг/кг. В то же время в 2022 году более высокое накопление меди отмечено у сорта Alanga по сравнению с сортом Lazurniy. У обоих сортов биоаккумуляция меди была выше в корневой системе, чем в стеблевых органах растений.

В контрольных вариантах биоаккумуляция цинка в стеблевых органах составила 8,54-12,60 мг/кг у сорта Alanga и 9,52-15,20 мг/кг у сорта Lazurniy. В вариантах с трёхкратным превышением предельно допустимой концентрации (ПДК) содержание цинка достигало 14,08-19,38 мг/кг у сорта Alanga и 14,25-23,38 мг/кг у сорта Lazurniy. Установлено, что с увеличением уровня загрязнения возрастало и накопление цинка в стеблевых органах растений. Наибольшие значения отмечены в вариантах с пятикратным превышением ПДК и при комплексном загрязнении. Максимальное содержание цинка в стеблевых органах сорта Lazurniy достигло 31,52 мг/кг. У сорта Alanga также наблюдалась высокая биоаккумуляция цинка, причём в отдельных вариантах его содержание было значительно выше по сравнению с контрольным вариантом. Полученные результаты свидетельствуют о прямой зависимости накопления цинка в стеблевых органах обоих сортов риса от уровня загрязнения почвы.

В контрольных вариантах биоаккумуляция свинца в стеблевых органах составила 2,22-3,25 мг/кг у сорта Alanga и 2,30-3,35 мг/кг у сорта Lazurniy. В 3-м и 4-м вариантах с трёхкратным превышением предельно допустимой концентрации (ПДК) содержание Pb в стеблевых органах сорта Alanga варьировало от 6,28 до 11,38 мг/кг, тогда как у сорта Lazurniy - от 5,40 до 12,49 мг/кг. В вариантах с трёхкратным комплексным загрязнением содержание свинца достигало 8,21-9,26 мг/кг, а при пятикратном загрязнении - 12,30-14,35 мг/кг. В 6-м варианте с комплексным загрязнением у сорта Lazurniy содержание Pb составило 10,62-16,35 мг/кг. Полученные результаты свидетельствуют о том, что с повышением уровня загрязнения возрастает накопление свинца в стеблевых органах растений. Кроме того, при высоких концентрациях загрязнения наблюдалось увеличение коэффициента биоаккумуляции (BAF).

При совместном анализе стеблевых и листовых органов сортов риса установлено, что в контрольных и обработанных минеральными удобрениями

вариантах биоаккумуляция никеля находилась в пределах 0,03–0,07 мг/кг. Поскольку основная часть ионов никеля задерживалась в корневой системе, его содержание в стеблевых и листовых органах оставалось сравнительно низким. Максимальная биоаккумуляция никеля отмечена в стеблевых и листовых органах сорта Alanga в 6-м варианте с комплексным загрязнением семью видами элементов и составила 0,33-0,51 мг/кг. В целом установлено, что накопление никеля в надземных органах риса ограничено, тогда как основная его часть аккумулируется в корневой системе растений.

В ходе исследований установлено, что у обоих сортов риса наблюдалась значительная биоаккумуляция кадмия (Cd) в стеблевых и листовых органах. В контрольных вариантах содержание Cd составляло 0,045-0,060 мг/кг. В вариантах с трёх- и пятикратным превышением предельно допустимой концентрации (ПДК) содержание кадмия в стеблевых органах сорта Alanga составило соответственно 0,165-0,272 мг/кг и 0,425-0,591 мг/кг, а у сорта Lazurniy - 0,212-0,384 мг/кг и 0,435-0,523 мг/кг. Наиболее высокая биоаккумуляция Cd отмечена в стеблевых и листовых органах сорта Alanga, особенно в 6-м варианте с комплексным загрязнением, где среднее значение превышало показатели контрольного варианта в 3,02 раза. Установлено, что активное накопление ионов кадмия как в корневой системе, так и в стеблевых и листовых органах является характерной особенностью обоих сортов риса (табл. 1).

Таблица 1

Содержание тяжёлых металлов в стеблевых органах сортов риса в вариантах вегетационного опыта, мг/кг сухого вещества (2021-2023 гг.)

№	Наименование вариантов	Стебель сорта Alanga			Стебель сорта Lazurniy		
		2021 г.	2022 г.	2023 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Кадмий (Cd) ПДК - 0,2							
1	Контроль (почва без загрязнения)	0,062	0,045	0,052	0,054	0,061	0,045
2	Фон (минеральные удобрения $N_{180}P_{150}K_{150}$)	0,071	0,052	0,056	0,065	0,073	0,069
3	Фон+Cd (3 ПДК)	0,272	0,181	0,165	0,384	0,261	0,212
4	Фон +Cd (5 ПДК)	0,511	0,591	0,425	0,523	0,472	0,435
5	Фон + Комплекс элементов (3 ПДК)	0,384	0,351	0,465	0,385	0,341	0,411
6	Фон + Комплекс элементов (5 ПДК)	0,624	0,673	0,512	0,495	0,521	0,471
Хром (Cr) ПДК – 10							
1	Контроль (почва без загрязнения)	1,24	1,37	1,305	1,51	1,44	1,48
2	Фон (минеральные удобрения $N_{180}P_{150}K_{150}$)	1,28	1,39	1,33	1,60	1,46	1,53
3	Фон +Cr (3 ПДК)	6,34	9,54	8,44	7,98	9,78	9,88
4	Фон +Cr (5 ПДК)	9,51	12,58	11,55	12,14	13,79	12,90
5	Фон + Комплекс элементов (3 ПДК)	7,57	8,63	9,60	8,91	9,65	9,78
6	Фон + Комплекс элементов (5 ПДК)	11,64	12,72	13,68	14,02	12,69	11,86

Кобальт (Co) ПДК - 1							
1	Контроль (почва без загрязнения)	0,32	0,13	0,23	0,27	0,10	0,19
2	Фон (минеральные удобрения $N_{180}P_{150}K_{150}$)	0,37	0,13	0,25	0,32	0,10	0,21
3	Фон +Co (3 ПДК)	0,49	0,16	0,33	0,39	0,23	0,31
4	Фон +Co (5 ПДК)	0,62	0,28	0,45	0,5	0,25	0,40
5	Фон + Комплекс элементов (3 ПДК)	0,30	0,28	0,29	0,44	0,13	0,29
6	Фон + Комплекс элементов (5 ПДК)	0,30	0,45	0,38	0,52	0,30	0,41
Цинк (Zn) ПДК-50							
1	Контроль (почва без загрязнения)	8,54	12,6	10,57	10,35	9,52	9,94
2	Фон (минеральные удобрения $N_{180}P_{150}K_{150}$)	9,99	14,74	12,37	12,11	11,14	11,62
3	Фон +Zn (3 ПДК)	34,08	49,38	46,73	44,25	47,00	57,13
4	Фон +Zn (5 ПДК)	65,98	67,19	51,59	55,20	53,38	59,29
5	Фон + Комплекс элементов (3 ПДК)	49,25	47,86	45,56	48,74	47,05	42,90
6	Фон + Комплекс элементов (5 ПДК)	63,98	59,13	66,56	61,02	63,69	60,36
Никель (Ni) ПДК - 1							
1	Контроль (почва без загрязнения)	0,06	0,03	0,05	0,09	0,03	0,06
2	Фон (минеральные удобрения $N_{180}P_{150}K_{150}$)	0,07	0,03	0,05	0,11	0,03	0,07
3	Фон +Ni (3 ПДК)	0,13	0,19	0,16	0,12	0,13	0,13
4	Фон +Ni (5 ПДК)	0,29	0,23	0,26	0,36	0,23	0,30
5	Фон + Комплекс элементов (3 ПДК)	0,43	0,23	0,33	0,19	0,08	0,14
6	Фон + Комплекс элементов (5 ПДК)	0,51	0,33	0,42	0,22	0,18	0,20
Свинец (Pb) ПДК – 5							
1	Контроль (почва без загрязнения)	3,21	2,22	2,22	2,30	3,28	2,79
2	Фон (минеральные удобрения $N_{180}P_{150}K_{150}$)	3,25	2,92	2,82	3,35	3,28	3,31
3	Фон+Pb (3 ПДК)	6,28	7,43	7,36	5,40	7,30	7,35
4	Фон +Pb (5 ПДК)	11,38	8,52	9,45	10,59	11,33	12,46
5	Фон+ Комплекс элементов (3 ПДК)	8,21	8,30	9,26	7,43	8,30	8,37
6	Фон+ Комплекс элементов (5 ПДК)	13,25	14,35	12,30	10,62	16,35	14,49
Медь (Cu) ПДК - 10							
1	Контроль (почва без загрязнения)	1,23	2,05	1,44	2,39	1,85	1,77
2	Фон (минеральные удобрения $N_{180}P_{150}K_{150}$)	1,27	2,49	1,58	2,63	2,25	2,09
3	Фон+Cu (3 ПДК)	4,31	4,47	4,89	4,08	3,58	4,23
4	Фон+Cu (5 ПДК)	6,58	5,4	6,49	5,16	6,73	5,35
5	Фон+ Комплекс элементов (3 ПДК)	4,13	4,01	4,57	4,8	4,53	4,02
6	Фон+ Комплекс элементов (5 ПДК)	6,17	6,26	5,72	6,14	6,88	6,91

Заключение.

По результатам проведённых исследований установлено, что уровень биоаккумуляции тяжёлых металлов (Cd, Cr, Co, Zn, Ni, Pb и Cu) в стеблевых и листовых органах сортов риса Alanga и Lazurniy, выращенных на орошаемых почвах, искусственно загрязнённых тяжёлыми металлами различной степени, находится в прямой зависимости от уровня загрязнения почвы. Наибольшие показатели биоаккумуляции всех исследованных элементов отмечены в

вариантах с пятикратным превышением предельно допустимой концентрации (ПДК) и при комплексном загрязнении.

По результатам исследований установлено, что сорт Lazurniy характеризовался более высокой способностью к накоплению хрома, цинка, свинца и меди по сравнению с сортом Alanga. При этом кадмий активно биоаккумулировался в стеблевых и листовых органах обоих сортов, тогда как накопление никеля в надземных органах было ограниченным, поскольку основная его часть задерживалась и аккумулировалась в корневой системе растений.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что особенности накопления тяжёлых металлов сортами риса определяются как биологическими особенностями сорта, так и уровнем загрязнения почвы. Представленные данные имеют важное значение для экологической оценки почв, загрязнённых тяжёлыми металлами, определения устойчивости сортов риса к загрязнению тяжёлыми металлами, а также для разработки научно обоснованных рекомендаций по их использованию в технологиях фиторемедиации.

Список литературы

1. Указ Президента Республики Узбекистан от 21 февраля 2024 года № ПФ–37 «О дополнительных мерах по охране почвенных ресурсов и повышению их плодородия в 2024–2026 годах». Приложение 2, пункт 54.
2. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. – М.: ЦИНАО, 1992. – 61 с.
3. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.
4. Alloway B.J. Heavy Metals in Soils. Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. 3rd ed. Dordrecht: Springer, 2013.
5. Clemens S., Ma J.F. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods // Annual Review of Plant Biology. 2016. Vol. 67. P. 489–512.