

## НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ РАСТЕНИЯМИ ПШЕНИЦЫ НА РАННИХ ЭТАПАХ РАЗВИТИЯ

*В эксперименте исследовано поступление тяжелых металлов в растения пшеницы, выращиваемые в условиях лабораторного опыта на вариантах с увеличивающейся концентрацией ионов никеля, хрома, кобальта и марганца. Установлено, что при возрастании концентрации ионов тяжелых металлов в питательном растворе значительно увеличивается содержание загрязнителей в проростках растений, причем эффекты прорастания семян могут быть заторможены малыми концентрациями ионов тяжелых металлов.*

### Введение

Потенциальные возможности сельскохозяйственных культур могут быть реализованы лишь при соблюдении всех агротехнических приемов и посеве высококачественными семенами. Предпосевной обработкой семян достигается обеззараживание их от возбудителей болезней, передающихся через семенной материал (семенная инфекция), снижение поражения всходов возбудителями болезней, находящимися в почве (почвенная инфекция), повышение энергии прорастания семян и полевой всхожести и стимулирование роста и развития растений.

Наиболее эффективным способом обеззараживания семян является инкрустация – обработка семян пленкообразующими составами, обяза-

тельным компонентом которых, кроме протравителя, является прилипатель, в качестве которого в производстве используется NaКМЦ (натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы), ПВС (поливиниловый спирт) и препарат М-3, ограничено используются также ЖКУ (жидкие комплексные удобрения) [1].

Известно, что биологический потенциал продуктивности сельскохозяйственных культур формируется на начальных этапах развития растений – до окончания IV этапа органогенеза [2]. В дальнейшем при наступлении неблагоприятных почвенно-климатических условий произрастания в процессе вегетации растений происходит лишь редукция органов, обеспечивающих получение высокого урожая. Состав патогенного комплекса семян включает десятки видов грибов, бактерий и вирусов, среди которых преобладают особенно вредоносные возбудители болезней, такие, как твердая, пыльная и другие виды головни, снежная плесень, гельминтоспориозные и фузариозные корневые гнили, септориоз, фузариоз колоса, различные пятнистости, а также плесневение семян. Прямые потери зерна, вызываемые комплексом этих болезней, как правило, достигают 20%, а при сильной зараженности болезнями и вредителями зерно становится непригодным даже на фуражные цели, в связи с чем химическое обеззараживание посевного материала является одним из обязательных приемов технологии возделывания сельскохозяйственных культур. Несмотря на то, что применяемые в настоящее время протравители содержат в своем составе прилипатель, в процессе обработки семян его потери значительны и достигают 30%, что оказывает существенный вред окружающей среде.

В материалах ЦОС ВИУА содержатся сведения о динамике поступления микроэлементов в озимую пшеницу, где определяли их содержание в фазе кущения (когда отмечаются высокая степень поглощения питательных веществ и интенсивное нарастание биомассы), в фазе выхода в трубку и в фазе созревания (когда заканчивается формирование элементного химического состава растений и их репродуктивных органов). При этом в фазе кущения была выявлена максимальная концентрация всех указанных элементов в корнях и зеленой массе [3].

Следует отметить, что в современной литературе практически отсутствуют сведения о влиянии химических средств защиты на накопление микроэлементов и тяжелых металлов в растениях на начальных этапах развития, хотя понимание этого процесса важно с точки зрения выбора такого препарата с соответствующим действующим веществом, который обеспечит максимальную защиту растения от комплекса болезней и вредителей и создаст наиболее “комфортные” условия для роста и развития растения на ранних этапах органогенеза, что в свою очередь приведет к формированию более высокого потенциала продуктивности [4].

### Материалы и методы исследования

Для определения степени приспособляемости растений к ухудшающимся условиям произрастания в лабораторных условиях были проведены модельные опыты по изучению влияния увеличивающейся концентрации ионов тяжелых металлов – никеля, кобальта, хрома и марганца – на энергию прорастания и лабораторную всхожесть пшеницы. Выбор используемых в работе тяжелых металлов обусловлен несколькими причинами. Во-первых, несмотря на то, что они относятся к элементам со средней и слабой степенью поглощения, их вредоносность при превышении уровня ПДК очень существенна. Во-вторых, изучаемые элементы входят в состав большинства современных фунгицидов для протравливания семян. Поскольку протравливание семян является одним из важнейших элементов интенсивной технологии возделывания сельскохозяйственных культур в окружающую среду через семена может поступить до 30% действующего вещества препарата за счет его потерь, в том числе и избыточные количества изучаемых тяжелых металлов.

*Никель* широко распространен в природе и входит в состав пищевых продуктов. Предположительно, Ni входит в состав фермента уреазы, который участвует в метаболизме азота в растениях. Токсический уровень Ni в листьях растений составляет более 3,0 мг/кг сухого вещества и наиболее выражен на некультуренных почвах, поскольку в отличие от Cd он не активизирует процесс синтеза металл – связывающего белка.

*Хром* входит в элементный состав растений и оказывает стимулирующее действие на рост и развитие. Концентрации элемента более 1 мг/кг считаются токсичными для растений. В промышленных районах усиливается миграция Cr в пищевой цепи: атмосфера – почва – растение – человек.

*Кобальт*. Содержание Co в тканях растений, произрастающих в естественных условиях, не превышает 1 мг/кг. Для овса, выращиваемого на всех типах почв, элемент является токсичным в концентрациях, превышающих 10–70 мг/кг. На проростки кукурузы он оказывал негативное воздействие в концентрации 25 мг/кг. В опытах с проростками хлопка, овса, гороха и огурцов торможение развития корней более чем на 20% происходит при накоплении Co в почвах более 20 мг/кг. При избыточном накоплении корнями растений Co включается главным образом в транспирационный поток, что приводит к обогащению этим металлом краев и кончиков листьев, которые белеют и затем отмирают.

*Марганец* служит катализатором процесса дыхания растений и принимает участие в фотосинтезе, усиливает гидролитические процессы, в результате чего происходит активизация образования аминокислот и поступление ассимилятов от листьев к корням и другим органам растений. Наиболее чувствительными к токсичному воздействию соединений Mn являются: бобовые, злаки, картофель и капуста.

Выбор методики проведения исследований обуславливался требованиями Государственного стандарта ГОСТ 12038-84 “Семена сельскохо-

зайтвенных культур. Методы определения всхожести” [5]. В качестве альтернативных вариантов рассматривалось проращивание семян в чашках Петри или растильнях. Наиболее целесообразным с точки зрения необходимости дальнейшего проведения эксперимента признан вариант с проращиванием семян с использованием лабораторных стаканов в растворах, а не на твердом субстрате. Такой вариант позволяет отобрать в чистоте 7-дневные проростки растений для их дальнейшего анализа с использованием рентгено-флуоресцентного анализа.

Для фиксации зерен использовались листы фильтровальной бумаги размером  $20 \times 41$  см. На расстоянии 8,5 см от нижнего края простым карандашом проводилась прямая горизонтальная линия. Вдоль этой линии фиксировалось 70 зерен, причем зерна располагались вплотную друг к другу. В качестве прилипателя (клеящего вещества) использовался раствор желатина пищевого. Листы с наклеенными зернами аккуратно вставлялись в лабораторные стаканы емкостью 2 (два) литра, при этом зерна находились между стенками стакана и фильтровальной бумагой.

В соответствии со схемой эксперимента готовились растворы никеля сернокислого ( $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), хромового ангидрида ( $\text{CrO}_3$ ), кобальта сернокислого ( $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) и марганца сернокислого ( $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) с концентрациями 1 ПДК, 2 ПДК и 5 ПДК.

Стаканы с закрепленными зернами аккуратно заливались приготовленными растворами солей таким образом, чтобы зерна плотно прилегали к стеклу и чтобы жидкость немного не доставала до их уровня. При этом жидкость по фильтровальной бумаге постепенно поднималась, захватывая всю поверхность листа. На протяжении всего эксперимента поддерживался достаточно высокий уровень растворов в стаканах. Учет показателей энергии прорастания производился через 72 часа в соответствии с существующими методиками [5]. В ходе эксперимента особое внимание обращалось на количество проросших и не проросших зерен и дополнительно на количество проросших зерен с длиной корня более 1 см. Учет показателей способности к прорастанию производился на 7-й день (через 168 ч). При этом подсчитывалось количество не проросших зерен, количество проросших зерен с длиной корня более 1 см и количество проросших зерен с зелеными ростками.

После учета проросших растений и определения лабораторной всхожести семян 7-дневные проростки отдельно по каждому варианту опыта подвергались сушке при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. При сушке исключалось попадание на растения прямого солнечного излучения. Воздушно-сухие образцы растительности измельчались в лабораторной мельнице, прессовались в таблетки, которые помещались в пакеты из кальки, маркировались и в дальнейшем анализировались на содержание микроэлементов методом рентгено-флуоресцентного анализа на приборе марки РФА-СЕР-01 производства фирмы ElvaX (Украина) с использованием методики выполнения измерений МВИ. МН 3272-2009, утвержденной Белорусским государственным институтом метрологии [6].

Статистическая обработка полученных результатов исследований проводилась с использованием прикладных программных пакетов "MatLab R2007b", "Statistica for Windows", версия 6.0 и программного продукта "Microsoft Excel 2003". Поскольку в ряде случаев предположение о нормальности закона действия распределения остаточных случайных величин в моделях, описанных в дисперсионном анализе, не выполнялось, при статистической обработке автором дополнительно были применены различные непараметрические методы проверки однородности выборок для оценки влияния различных факторов на исследуемый признак с использованием непараметрического критерия Фридмана.

### Результаты и их обсуждение

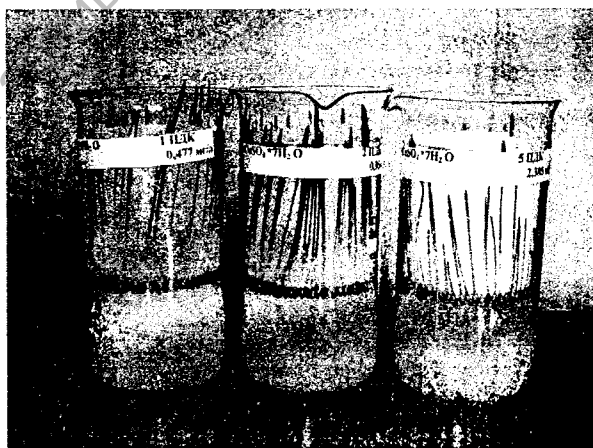
В результате проведенных исследований установлено, что при возрастании концентрации ионов никеля, кобальта и хрома в растворе энергия прорастания семян пшеницы существенно снижается, особенно при увеличении концентрации  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (табл. 1, рис.). Изменение концентрации марганца в питательном растворе в изучаемом диапазоне достоверно не влияет на энергию прорастания семян.

Таблица 1

Энергия прорастания семян пшеницы в зависимости от концентрации загрязнителей, %

	Контроль	1 ПДК	2 ПДК	5 ПДК
$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	94,3	80,0	75,7	88,6
$\text{CrO}_3$	94,3	92,9	97,1	85,7
$\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	94,3	91,9	93,3	56,1
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	94,3	93,8	96,7	94,8

НСР<sub>05</sub> 2,9



Способность семян к прорастанию в зависимости от концентрации  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Данные, полученные в ходе эксперимента, свидетельствуют, что эффекты прорастания семян могут быть заторможены малыми концентрациями ионов тяжелых металлов [7]. Ионы цинка и кобальта проявляют более высокий уровень токсичности.

Поскольку одной из важнейших задач исследований являлось изучение интенсивности и динамики накопления загрязнителей в растениях на ранних этапах развития, проростки растений, выращенные на вариантах с различной величиной ПДК тяжелых металлов никеля, кобальта, марганца и хрома, были высушены до воздушно-сухого состояния и проанализированы на содержание химических элементов с использованием рентгено-флуоресцентного анализа [8].

В результате эксперимента установлено, что при увеличении концентрации ионов никеля от 1 ПДК (0,1 мг/л) до 5 ПДК (0,5 мг/л) и хрома от 1 ПДК (0,05 мг/л) до 5 ПДК (0,25 мг/л) в питательном растворе, содержание тяжелых металлов *никель, хром* и других элементов как в вегетативной массе, так и в корневой системе проростков по вариантам опыта колеблется незначительно (табл. 2).

Таблица 2

Содержание некоторых химических элементов  
в 7-дневных проростках и корневой системе пшеницы

Вариант опыта	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Sn</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>Cr</i>
	7-дневные проростки							
Контроль	6,4±1,3	56,2±3,5	8,8±1,0	32,0±1,8	1,3±0,2	0,5±0,3	0	14,1±2,4
1 ПДК <i>Ni</i>	6,6±1,4	62,8±4,1	4,3±0,8	33,2±2,0	0	35,5±2,4	0	2,2±1,0
2 ПДК <i>Ni</i>	6,3±1,2	57,3±3,5	6,7±0,9	29,8±1,7	0	12,0±1,3	0	3,7±1,2
5 ПДК <i>Ni</i>	5,1±1,1	49,2±3,2	14,8±1,3	26,6±1,6	1,1±0,1	30,1±2,0	0	2,3±1,0
Контроль	6,8±1,2	68,5±3,7	27,1±1,7	24,8±1,5	0	0	0	0
1 ПДК <i>Mn</i>	9,5±1,5	81,8±4,2	21,6±1,6	24±1,5	1,4±0,2	0	1,1±0,4	0
2 ПДК <i>Mn</i>	9,2±1,5	136±5,3	35,9±2,0	23,2±1,5	0	0	0	3,5±1,2
5 ПДК <i>Mn</i>	18±2,0	41,7±2,8	14,1±1,2	21,8±1,4	0	0	0	0
Контроль	7,5±1,3	75,3±3,9	21,8±1,5	27,8±1,6	1,1±0,1	0	0	2,5±1,0
1 ПДК <i>Co</i>	7,3±1,3	44,8±3,1	13,4±1,3	28,5±1,7	0	0	3,1±0,7	0
2 ПДК <i>Co</i>	5,9±1,2	55,7±3,4	28,1±1,8	27,7±1,6	1,4±0,2	0	20±1,8	1,3±0,7
5 ПДК <i>Co</i>	5,4±1,2	101±4,8	12,8±1,3	25,9±1,6	0	0	4,6±0,9	1,9±0,9
Контроль	7,5±1,3	75,3±3,9	21,8±1,5	27,8±1,6	1,1±0,1	0	0	2,5±1,0
1 ПДК <i>Cr</i>	7,1±1,6	60,5±4,4	26,1±2,1	31,6±2,1	0	0	1,1±0,4	5,3±1,8
2 ПДК <i>Cr</i>	6,3±1,2	59,2±3,6	45,8±2,4	28,5±1,7	1,1±0,1	0,3±0,2	0	10,2±2,0
5 ПДК <i>Cr</i>	7,2±1,3	64,6±3,8	23,3±1,7	27,4±1,7	0	0	0	2,8±1,1
	Корневая система 7-дневных проростков							
Контроль	5,6±1,1	54,6±3,4	6,1±0,8	16,9±1,3	1±0,1	0,6±0,3	0	4±1,3
1 ПДК <i>Ni</i>	5,7±1,2	63±3,9	4,1±0,7	19±1,4	0	16,7±1,6	0	4±1,3
2 ПДК <i>Ni</i>	7,8±1,4	62,9±3,9	7,3±1,0	20,6±1,5	1,2±0,2	15,7±1,5	0	3±1,2
5 ПДК <i>Ni</i>	6,1±1,2	91,1±4,5	7,2±0,9	14±1,2	1±0,1	24,1±1,8	1,3±0,4	3,3±1,2
Контроль	4,5±1,1	46,6±3,2	8,6±1,0	10,4±1,0	1,1±0,2	0	0	1,9±0,9
1 ПДК <i>Mn</i>	4,3±1,0	48,1±3,3	15,1±1,4	9±1,0	1,4±0,2	0	0	2,8±1,1
2 ПДК <i>Mn</i>	6,2±1,3	51,4±3,4	12,4±1,2	9,3±1,0	1,2±0,2	0	0	1,9±0,9
5 ПДК <i>Mn</i>	12,9±1,9	59,1±3,8	23,5±1,8	13,9±1,2	1,2±0,2	1,8±0,5	0	4,1±1,4
Контроль	4,5±1,1	46,6±3,2	8,6±1,0	10,4±1,0	0	0	0	1,9±0,9
1 ПДК <i>Co</i>	3,8±0,9	67,6±3,6	14,6±1,2	14,8±1,1	0	0	5±0,8	3,6±1,1
2 ПДК <i>Co</i>	7,3±1,3	77,5±3,9	10±1,0	22,9±1,4	0	0	26,5±2,0	2,5±1,0
5 ПДК <i>Co</i>	4,7±1,0	79,1±3,9	14,7±1,3	16,5±1,2	0	0	42,5±2,5	2,1±0,9
Контроль	7,4±1,3	94,2±4,5	35,8±2,1	23,1±1,5	1,1±0,1	0	0	1,4±0,7
1 ПДК <i>Cr</i>	7,2±1,3	50,7±3,3	16,9±1,4	26±1,6	1,3±0,2	0	0	100,4±6,5
2 ПДК <i>Cr</i>	6,7±1,3	94,3±4,5	31,7±2,0	24,7±1,6	1±0,1	0	0	85,1±5,9
5 ПДК <i>Cr</i>	7,6±1,5	70,6±4,2	11,7±1,3	25,1±1,7	1,4±0,2	0	0	88,2±6,5
	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Sn</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>Cr</i>

При возрастании концентрации ионов кобальта в питательном растворе от 1 ПДК (0,1 мг/л) до 5 ПДК (0,5 мг/л) содержание *кобальта* в растительном сырье значительно увеличивалось, особенно в корневой системе; в этих же условиях отмечалось также существенное увеличение содержания *железа*, особенно в вегетативной массе.

С увеличением концентрации ионов марганца в питательном растворе от 1 ПДК (0,1 мг/л) до 5 ПДК (0,5 мг/л) содержание *марганца* увеличивалось в 3 раза, по сравнению с контролем, как в вегетативной массе, так и в корневой системе растений ячменя. Следует также отметить, что в условиях опыта значительно увеличивалось содержание *железа* в вегетативной массе и *меди* в корневой системе.

Полученные нами результаты коррелируют с данными других исследователей, у которых включение в блок химизации пестицидов во всех случаях обеспечивало более низкое содержание меди и цинка, чем на соответствующем фоне удобрений, хотя и превышало их количество в варианте без удобрений и пестицидов [9]. В этих опытах наблюдалась некоторая тенденция увеличения содержания меди, цинка и кобальта в зерне озимой пшеницы, выращенной с применением комплекса средств химизации. При этом содержание меди было наибольшим при использовании минимальных норм средств химизации, и оно снижалось при средних и максимальных нормах практически до уровня контроля. Что касается цинка, то отмечалась тенденция к его увеличению в зерне при максимальных нормах применения. Такая реакция растений на использование цинка и меди определяется тем, что при комплексном применении средств химизации изменяется не столько доступность этих элементов в почве, сколько поглотительная способность растений под влиянием удобрений и пестицидов. Причем она изменяется по-разному для этих элементов, обуславливая, с одной стороны, более интенсивное потребление цинка при повышении норм средств химизации, а с другой – изменение потребления меди при внесении относительно небольших норм удобрений и пестицидов. Содержание других элементов в зерне практически не изменялось, однако было выше ПДК по кадмию и ртути в абсолютном контроле.

В других опытах исследовано поступление меди, цинка и свинца в растения ячменя, выращенные в условиях вегетационного опыта. Внесение тяжелых металлов в почву приводило к аккумуляции их в растениях. По уменьшению поступления в растения металлы образовывали следующий ряд:  $Zn \gg Cu > Pb$ . При увеличении загрязнения почв и комплексном загрязнении тяжелыми металлами происходило более интенсивное накопление меди и цинка в соломе ячменя, чем в зерне [10].

### Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что при возрастании концентрации ионов тяжелых металлов никель, хром, кобальт и марганец в питательном растворе значительно увеличивается содержа-

ние загрязнителей в проростках растений, причем эффекты прорастания семян могут быть заторможены даже малыми концентрациями ионов тяжелых металлов.

Выявленные закономерности повреждающего действия тяжелых металлов на растения на ранних стадиях развития позволяют разработать и внедрить в производство элементы технологий возделывания сельскохозяйственных культур, снижающие подвижность загрязнителей в биосфере и повышающие экологическую безопасность интенсивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Самсонаў, У.П.** Инкрустация насення яравога ячменю/ У.П. Самсонаў, С.С. Позняк // Весці ААН Беларусі. – 1994. – № 3. – С. 7–10.
2. Биология развития культурных растений / Ф.М. Куперман [и др.]. – М. : Высшая школа, 1982. – 343 с.
3. **Пронина, Н.Б.** Экологические стрессы (причины, классификация, тестирование, физиолого- биохимические механизмы) / Н.Б. Пронина. – М. : Изд-во МСХА, 2000. – 312 с.
4. **Позняк, С.С.** Методологические подходы к исследованию содержания микроэлементов в зерне ячменя в зависимости от применяемых средств интенсификации / С.С. Позняк // Экологический вестник. – 2008. – № 2(5). – С. 110–116.
5. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести: ГОСТ 12038-84 // База нормативных документов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.complexdoc.ru>. – Дата доступа : 09.08.2009.
6. **Позняк, С.С.** Методика выполнения измерений массовой доли химических элементов в пробах растительного и животного происхождения методом рентгено-флуоресценции [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.belgim.by/uploaded/file/inform\\_01\\_2011\\_1.pdf](http://www.belgim.by/uploaded/file/inform_01_2011_1.pdf). – Дата доступа : 28.03.2011.
7. **Позняк, С.С.** Влияние ионов никеля, хрома и кобальта на энергию прорастания и способность к прорастанию семян ячменя / С.С. Позняк, О.И. Швед // Сахаровские чтения 2007 года: экологические проблемы XXI века : материалы 7-й Международ. научной конф., 17-18 мая 2007 г., г. Минск, Республика Беларусь ; под ред. С.П. Кундаса, С.Б. Мельнова, С.С. Позняка. – Мн. : МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2007. – С. 106.
8. **Позняк, С.С.** Экологическое земледелие : монография/ С.С. Позняк, Ч.А. Романовский ; под общ. ред. к.с.-х.н. С.С. Позняка. – Минск : МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2009. – 327 с.
9. **Ладонин, В.Ф.** Влияние комплексного применения средств химизации на содержание тяжелых металлов в почве и растениях / В.Ф. Ладонин // Химия в сельском хозяйстве. – 1995. – № 4. – С. 32–35.
10. Накопление тяжелых металлов растениями ячменя на черноземе и каштановой почве / Т.М. Минкина [и др.] // Агрехимия. – 2009. – № 10. – С. 53–63.

Поступила в редакцию 03.06.2011 г.