

СОДЕРЖАНИЕ БИОФИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕРНЕ ЯЧМЕНЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ ПИТАНИЯ И ПРЕДОБРАБОТКИ САЛИЦИЛОВОЙ КИСЛОТОЙ

**Л.В. Осипова, д.б.н., Е.В. Любунь, к.б.н., Т.Л. Курносова, к.б.н.,
И.А. Быковская, Е.А. Федорова, к.с.-х.н., К.Ю. Ильченко,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии
имени Д.Н. Прянишникова» (ФГБНУ «ВНИИ агрохимии»)
12755, Россия, г. Москва, ул. Прянишникова, 31А;
E-mail: legos4@yandex.ru**

Представлены результаты исследований по определению исходного содержания биофильных элементов в посевном материале ярового ячменя и зерне растений, выращенных из этих семян. Показано влияние условий культивирования – обеспеченности основными минеральными элементами и предобработки исходных семян салициловой кислотой (ПОС СК) на поступление элементов питания, физиолого-биохимический статус растений в отдельные периоды вегетации и продуктивность ячменя.

Ключевые слова: яровой ячмень, макро-, мезо-, микроэлементы, предпосевная обработка семян (ПОС), салициловая кислота.

Для цитирования: Осипова Л.В., Любунь Е.В., Курносова Т.Л., Быковская И.А., Федорова Е.А., Ильченко К.Ю. Содержание биофильных элементов в зерне ячменя в зависимости от уровня питания и предобработки салициловой кислотой// Плодородие. – 2024. - №4. – С. 84-88. DOI: 10.25680/S19948603.2024.139.19.

Питание растений – основной фактор формирования продуктивности и устойчивости сельскохозяйственных культур. Нарушения в обеспеченности растений биофильными элементами невозможно компенсировать агрохимическими средствами. Эффективность применения регуляторов роста, средств защиты от болезней и вредителей зависит от условий питания растений, что не всегда учитывается в современных технологиях.

В условиях глобальных биосферных изменений, когда возросло воздействие на растения разнообразных абиотических и антропогенных стрессов, при этом снизилось обеспечение минеральными удобрениями и урожаи частично формируются за счет мобилизации почвенного плодородия, обострились взаимоотношения элементов в корнеобитаемой среде, возникло понятие минеральный стресс. Растения вынуждены адаптироваться не только к климатическим стрессам, но и к изменившимся условиям питания.

Растения, являясь важным звеном биогеохимического круговорота веществ, способны поглощать практически все химически элементы. Долгое время элементный состав рассматривался как наследственно-обусловленное свойство. Считалось, что растения стремятся к сохранению эволюционно-закрепленного элементного состава репродуктивных органов и, адаптируясь к окружающей среде, меняют содержание элементов в вегетативной массе. Позже было установлено, что репродуктивные органы подвержены влиянию всего комплекса факторов, сопровождающих растения в период вегетации. Некоторые авторы [13] полагают, что не генотип, а погодные условия являются основным фактором, оказывающим влияние на элементный состав зерна.

Оптимальное минеральное питание, обогащение зерна микроэлементами увеличивают вероятность синтеза соединений, повышающих адаптивность растений и профилактику заболеваний животных и человека.

Адаптация растений к стрессам происходит под воздействием химических сигналов, активирующих экспрессию генов, что приводит к синтезу белков-ферментов, участвующих в нейтрализации последствий окислительного стресса [1]. Одним из ключевых компонентов сигнальной сети является салициловая кислота (СК) – стрессовый фитогормон, участвующий в развитии защитных реакций при неблагоприятном действии абиотических и биотических факторов [2, 3].

Салициловая кислота – эндогенный метаболит фенольной природы, содержание которого увеличивается в неблагоприятных условиях. Подробное исследование механизма ее влияния на системную приобретенную устойчивость показало снижение повреждающего действия засухи, засоления, тяжелых металлов, низких и предельно высоких температур, токсического эффекта пестицидов и инфицирование патогенами [4, 5]. Доказано также ее участие в прорастании семян, цветении, фотосинтезе, дыхании, транспирации, синтезе гормонов [6]. Одной из функций СК является участие в поступлении элементов минерального питания и их транспорте по растению [7].

Установленная способность СК изменять свойства клеточных мембран, влияя на эффективность поглощения элементов питания, и ее роль в регуляции адаптивных реакций явились основанием для проведения исследований.

Цель исследований – оценить влияние салициловой кислоты и обеспеченности растений основными минеральными элементами на химический состав и продуктивность ярового ячменя.

Методика. Лабораторные и вегетационные опыты проводили с сортом ярового ячменя Надежный. Сорт включён в Госреестр селекционных достижений, допущенных к использованию в 2017 г. по Центральному (3), Волго-Вятскому (4) и Средневолжскому (7) регионам. Масса 1000 зерен – 41-50 г, максимальная урожайность

- 88,2 ц/га (Нижегородская область, 2015 г.), вегетационный период 71-89 дней.

Лабораторные эксперименты проводили в рулонной культуре (ГОСТ 120038-84) в климатической термокамере (при поддержании постоянной температуры и влажности воздуха) в оптимальных условиях в среде культивирования (7 сут) и при действии стресса, индуцированного осмотическим раствором сахарозы (двое сут на воде, затем 5 сут на осмотике). Затем проростки переносили на световую площадку на 45 мин. На первых критических этапах органогенеза, определяющих стратегию формирования продуктивности и реализацию адаптивного потенциала, когда происходит переход роста в темноте к росту на свету, перестраивается гормональный статус, активизируется синтез хлорофиллов и каротиноидов и начинается фотосинтез, оценивали физиолого-биохимические параметры проростков.

Вегетационный опыт по оценке влияния уровня минерального питания и действия салициловой кислоты на физиолого-биохимические показатели, продуктивность и микроэлементный состав зерна проводили на тяжелосуглистой аллювиальной луговой почве со следующей агрохимической характеристикой: содержание гумуса (по Тюрину, ГОСТ 2621391) – 2,1%; pH_{KCl} (ГОСТ 2648385) – 5,67; P_2O_5 и K_2O (по Кирсанову, ГОСТ 26207-91) – 34,4 и 251,9 мг/кг сухой почвы соответственно; Cu, Zn, Mn, B, Fe (ПНД Ф 16.2.2:2.3.71 - 2011 п.9.4, п.9.6.1-9.6.3 п.10) – 0,14, 1,04, 21,9, 2,54, 83,7 мг/кг, соответственно.

Растения выращивали на двух фонах питания с внесением основных минеральных элементов при закладке экспериментов из расчета $(NPK)_{150}$ и $(NPK)_{300}$ мг/кг. Предобработку семян проводили 0,05 мМ СК. В течение вегетации поддерживали оптимальный уровень водообеспеченности.

Физиологический статус растений оценивали по интенсивности перекисного окисления липидов (ПОЛ) мембран и активности синтеза фотосинтетических пигментов. Уровень окислительных процессов определяли по накоплению малонового диальдегида (МДА) на спектрофотометре Helios Omega UV-VIS по цветной реакции МДА, конечного продукта ПОЛ, с тиобарбитуровой кислотой.

Концентрацию МДА рассчитывали в мкМ/г сырой массы по молярной экстинкции ($\varepsilon = 1,56 \cdot 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$):

$$C = D / \varepsilon L m,$$

где C – концентрация МДА;

D – оптическая плотность вытяжки из верхних листьев, нм;

ε – коэффициент молярной экстинкции;

L – длина оптического пути, см;

m – масса навески, г.

Содержание фотосинтетических пигментов: хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов определяли в 100%-ной ацетоновой вытяжке спектрометрическим методом при длинах волн 662, 644, 440,5 нМ, соответственно. Устанавливали линейные размеры проростков и оценивали депрессию роста при осмотическом стрессе, индуцированном раствором сахарозы [8].

Содержание P, K, Ca, Mg, Fe, Mo, Mn, Cu, Zn определяли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP 6300 DUO.

Повторность опытов четырехкратная. Данные на рисунках и в таблицах представлены в виде средних, оценка достоверности различий устанавливалась по t-критерию Стьюдента.

Результаты и их обсуждение. В настоящее время установлена значительная вариабельность элементного состава зерна яровых пшеницы и ячменя. Преобладающее многие годы представление о генетической обусловленности содержания химических элементов в репродуктивных органах под влиянием накопленного фактического материала утратило главенствующее положение. В обзоре [9] приведены средние концентрации микроэлементов и пределы их изменения в зерновых культурах. Так, концентрация железа, марганца, меди, цинка, кобальта, молибдена и бора изменяется, соответственно, в диапазонах: Fe – 20,7-64,5 мг/кг, Mn – 21,3-71,1, Cu – 2,78-8,05, Zn – 19,8-47,4, Co – 0,79-0,252, Mo – 0,197-0,872, B – 0,78-1,62 мг/кг. Это свидетельствует об условности понятия постоянного химического состава семян. Однако существует консерватизм репродуктивных органов, выраженный в большей степени, чем в листьях и стеблях, который обусловлен необходимостью соответствовать потребностям проростка-гетеротрофа на первых этапах роста и развития.

Перед началом лабораторных экспериментов был определен химический состав исходных семян и проведен лабораторный опыт для оценки статуса проростков. Установлено, что содержание кальция, магния, кремния и серы в зерне составило, соответственно, 782, 921, 963 и 1089 г/кг.

Содержание элементов в проростках, выращенных из зерновок, предварительно обработанных салициловой кислотой, представлено в таблице 1.

Предобработка семян салициловой кислотой в разной степени повлияла на содержание отдельных элементов: достоверно снизила концентрацию калия в ростках на 17,7% и увеличила содержание магния в корнях проростков на 12%. Оценивая активность транспорта ионов из корня в побег по величине коэффициента транслокации (КТ), можно отметить увеличение интенсивности передвижения калия, магния, кремния и серы из корневой системы в надземную часть под влиянием СК.

1. Содержание макро-, мезо- и микроэлементов (МЭ) в проростках ячменя в зависимости от ПОС СК, мг/кг

Элемент	Контроль			ПОС СК		
	росток	корень	КТ*	росток	корень	КТ
Содержание макро-, мезоэлементов						
P	17196	7727	0,45	16778	7492	0,45
K	23767	11451	0,48	1954	1103,2	0,56
Ca	3698	4521	1,22	3632	4528	1,24
Mg	1598	1001	0,62	1522	1123	0,74
Si	141	189	1,33	137	205	1,49
S	2908	2253	0,77	2928	2394	0,82
Содержание МЭ						
Fe	85,0	107,1	1,26	81,8	103,3	1,26
Zn	74,0	84,7	1,14	66,8	62,1	0,92
Mn	32,0	31,4	0,98	28,7	27,8	0,96
Cu	15,0	10,0	0,67	14,5	16,3	1,12
Mo	< 0,25	< 0,25	-	< 0,25	< 0,25	-

*КТ – коэффициент транслокации.

Под влиянием СК содержание железа, марганца и, особенно, цинка, в проростках ячменя снижалось, а поступление меди в корневую систему возрастало. Передвижение микроэлементов железа и марганца из корней в надземную часть не зависело от СК. Линейные размеры проростков и

их масса под действием СК увеличивались: на 26,7% у ростков и на 16% у корней. По мнению [11], это обусловлено взаимодействием СК с ауксином, синтез которого активируется и стимулирует ростовую функцию.

В вегетационном эксперименте при анализе растений в фазе кущения обнаружено, что количество мезо- и макроэлементов значительно увеличивается по сравнению с их содержанием в зерновках: в 10 раз возрастает содержание калия и кальция; магния и серы, соответственно, в 2 и 1,5 раза; в меньшей степени меняются концентрации

цинка, меди, железа и марганца. Высокие концентрации элементов в молодых листьях растений обусловлены, возможно, потребностью растительного организма. По мнению [10], у растений отсутствует необходимость накопления калия и кальция в семенах, так как они играют стабилизирующую роль в процессах метаболизма. Повышение накопления этих элементов в начале вегетации отвечает физиологическим потребностям растущего растения (табл. 2).

2. Содержание элементов в растениях ячменя на III этапе развития

Вариант	P	K	Ca	Mg	Si	S	Fe	Zn	Mn	Cu
Контроль	2881,3	50171,2	105354,0	3198,6	196,0	4356,2	230,0	61,0	63,0	8,9
ПОС СК	2661,0	42423,8	91438,1	2620,4	177,4	4316,5	256,0	62,0	59,0	6,1

В начале вегетации (III-IV этапы органогенеза) в листьях растений, семена которых были обработаны СК, снизилось содержание всех макро-, мезоэлементов и меди. При этом изменился редокс-статус, о котором судили по содержанию МДА, конечного продукта перекисного окисления липидов мембран (ПОЛ). МДА считается маркером интенсивности процессов, в которых образуются свободные радикалы, в том числе и активные формы кислорода (АФК). Многие годы АФК относили к эндогенным метаболитам, повреждающим клеточные структуры. Установленные сигнальные

функции АФК расширили представление об их роли в физиолого-биохимических реакциях. Показано, что АФК взаимодействует с СК, изменяя редокс-статус клеток, экспрессию генов и активируя синтез белков [12]. СК снижала интенсивность ПОЛ также в периоды кущения-стеблевания и цветения-оплодотворения (рис. 1). Содержание фотосинтетических пигментов при этом было выше, чем на контроле (табл. 3), что свидетельствует о снижении интенсивности окислительных процессов.

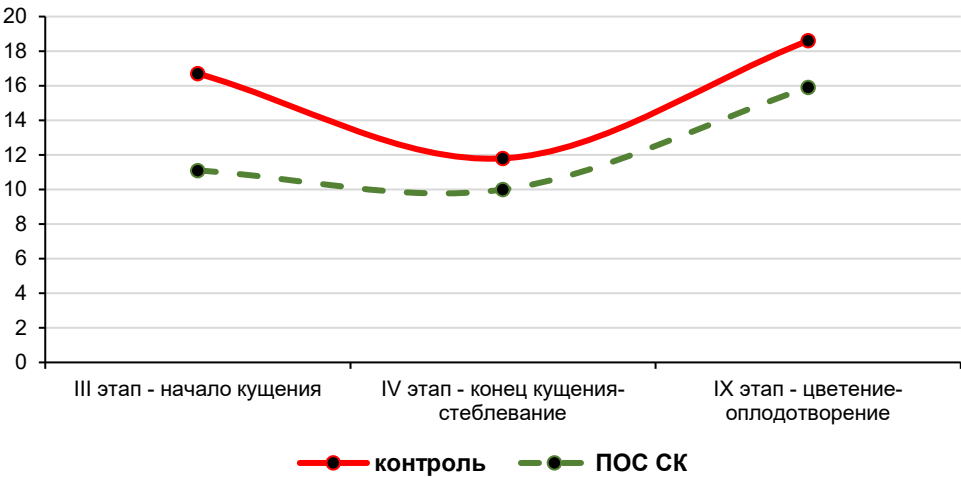


Рис. 1. Влияние СК на содержание МДА в онтогенезе, мкмМ/г (фон I)

3. Влияние салициловой кислоты на содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях в онтогенезе ячменя, мг/г сырой массы

Вариант	Выход в трубку				Цветение							
					(NPK) ₁				(NPK) ₂			
	a	b	Σa и b	каротиноиды	a	b	Σa и b	каротиноиды	a	b	Σa и b	каротиноиды
Контроль	0,68±0,042	2,32±0,12	3,0	14,66±0,57	1,12±0,32	0,87±0,05	1,99	14,3±0,79	1,11±0,034	1,08±0,048	2,19	14,4±0,51
ПОС СК	0,88±0,039	2,63±0,18	3,51	17,16±0,69	1,31±0,42	1,86±0,84	3,17	21,1±0,98	1,21±0,058	1,85±0,07	3,06	16,23±0,58

Увеличение синтеза МДА в период опыления и оплодотворения связано с возрастанием интенсивности окислительно-восстановительных процессов при специфическом физиологическом взаимодействии продвигающихся пыльцевых трубок к зародышевому мешку [11].

Возрастание фона питания способствовало увеличению содержания всех минеральных элементов в зерне и соломе ячменя нового урожая (табл. 4). Влияние СК на

элементный состав зерна слабо изучено. Физиологические механизмы действия СК на элементный состав не исследованы.

Предполагается, что ее участие в поступлении биогенных элементов может быть связано с влиянием на активность трансмембранных белков-переносчиков металлов [14].

На низком фоне минерального питания предобработка семян СК приводила к повышению в зерне всех изучаемых элементов, кроме железа, содержание которого уменьшалось на 26,8% и не влияло на медь и кальций. Повышение обеспеченности основными минералами увеличивало эффективность действия СК на микроэлементы: железо, цинк, марганец и медь, соответственно, на 27,0; 31,5; 24,3; 25,7% и снижало ее влияние на поступление калия, кальция и серы на 18,7; 13,5 и 19,7% (табл. 4, рис. 2, 3).

В проведенных экспериментах в разных вариантах опыта элементный состав зерновок, выращенных из семян с исходным содержанием биогенных элементов, значительно различался (см. табл. 4, рис. 2, 3).

В исходных семенах было значительно больше кальция, магния, цинка, марганца и меди, чем в зерне,

полученном в вегетационном опыте. Исходное зерно было меньше обогащено серой.

Накопление калия в зерне увеличивалось на фоне NPK, салициловая кислота стимулировала поступление калия в зерно на фоне (NPK)₁ и тормозила на фоне (NPK)₂.

Содержание кальция, магния и серы возрастало при ПОС СК на обоих фонах питания. Салициловая кислота стимулировала накопление железа в зерне на высоком минеральном фоне, а в соломе - при всех изучаемых фонах.

Под действием СК повышалось содержание цинка в зерне и соломе, а марганца – только в зерне. Содержание меди увеличивалось только в зерне при высокой обеспеченности основными минеральными элементами.

Стимулирующее действие СК может быть обусловлено ее влиянием на активность трансмембранных белков-переносчиков ионов металлов.

4. Влияние ПОС СК на содержание элементов в зерне и соломе ярового ячменя

Вариант		Fe	Zn	Mn	Cu	P	K	Ca	S	Mg
		мг/кг				г/кг		мг/кг		
Оптимальные условия, (NPK) ₁	Зерно									
	Контроль	21,9	28,55	10,57	1,89	1,57	2,79	396,76	1148,8	511,19
	ПОС СК	16,02	34,64	12,59	2,0	2,70	3,23	409,33	1662,04	651,56
	Солома									
	Контроль	67,33	17,82	16,64	2,46	0,87	2,38	3034,02	3346,34	1047,47
Оптимальные условия, (NPK) ₂	Зерно									
	Контроль	19,77	51,77	14,0	2,60	2,39	3,68	532,44	1674,0	733,09
	ПОС СК	25,11	35,93	17,40	3,27	3,02	2,99	460,54	2003,6	765,81
	Солома									
	Контроль	118,49	20,03	22,0	3,01	1,0	1,82	4259,36	4081,34	1281,36
	ПОС СК	124,75	29,84	19,97	3,0	0,97	3,13	3920,3	3800,65	1214,49

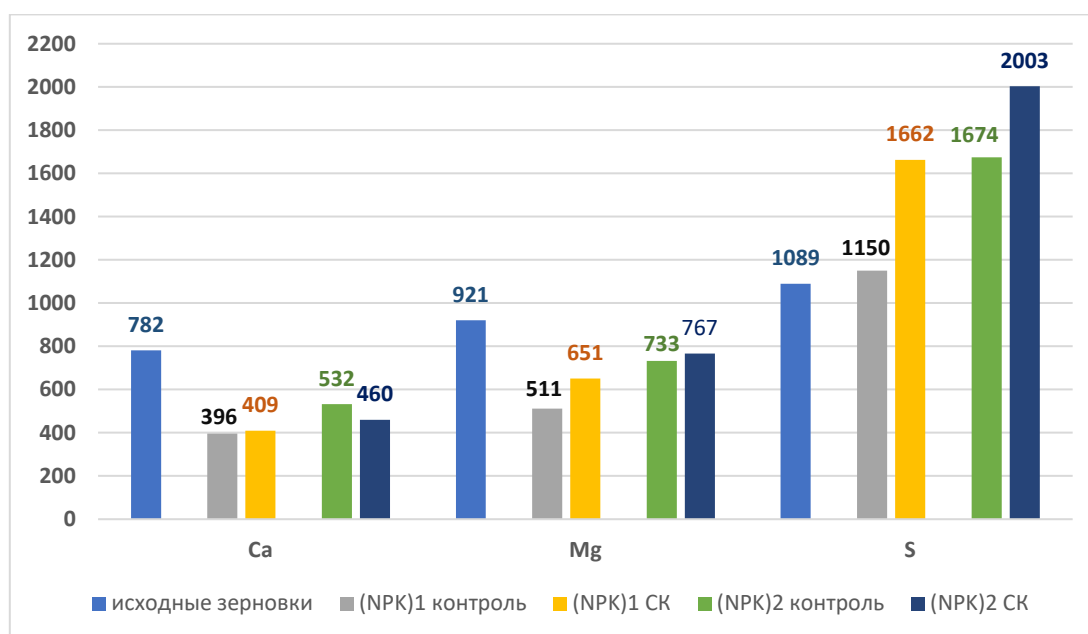


Рис. 2. Содержание мезоэлементов в зерне ярового ячменя на фонах с различной обеспеченностью NPK

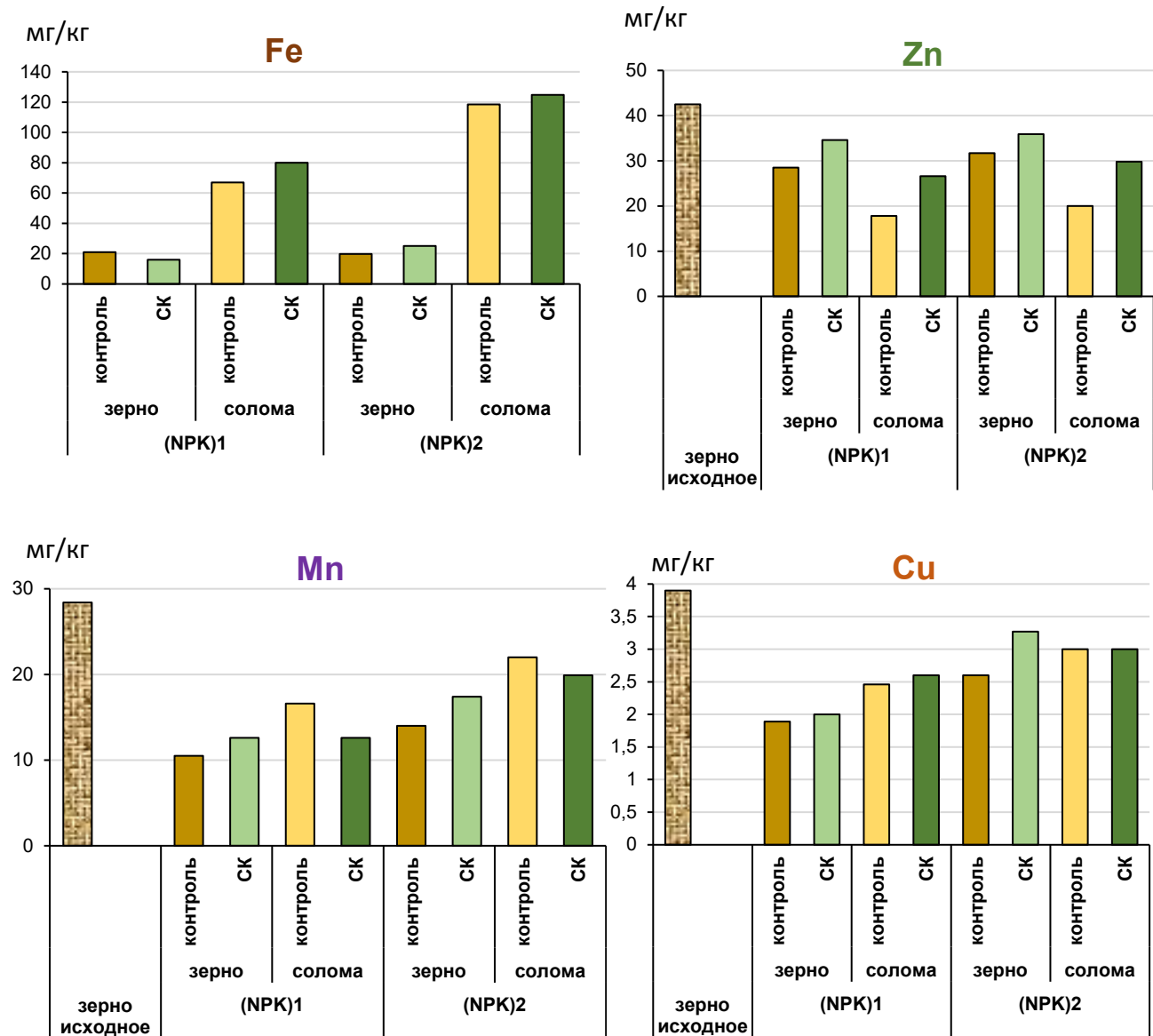


Рис. 3. Влияние ПОС СК на содержание железа, цинка, марганца и меди в зерне ярового ячменя на разных фонах обеспеченности основными питательными элементами

Содержание элементов в соломе также зависело от ПОС СК. На низком фоне питания поступление всех элементов, кроме марганца, возрастало, на высоком – снижалось содержание мезоэлементов (Ca, S, Mg), не изменялось количество меди и фосфора; увеличивалось количество железа, цинка и калия (табл. 5).

Условия минерального питания и ПОС СК определяли продуктивность ячменя. Повышение фона питания приводило к увеличению массы зерна с главного колоса в

контрольном варианте и не влияло на продуктивность колоса в варианте с предобработкой СК (рис. 4).

При пониженной обеспеченности основными минеральными элементами СК способствовала возрастанию зерновой продуктивности главного колоса за счет меньшей редукции заложившихся зерновок на VI этапе. Масса зерна целого растения была больше за счет продуктивного кушения, особенно в контрольных вариантах.

5. Влияние СК на изменение содержания элементов, % к контролю

Вариант		Fe	Zn	Mn	Cu	P	K	Ca	S	Mg
Зерно	Фон I	-26,8	21,3	19,1	0	71,9	15,8	0	44,7	27,5
	Фон II	27,0	13,3	24,3	25,7	26,4	-18,7	-13,5	-19,7	0
Солома	Фон I	19,5	49,0	-24,3	5,7	13,8	19,3	14,6	16,3	8,5
	Фон II	5,3	48,9	-9,2	0	0	71,9	-7,9	-6,9	-5,2

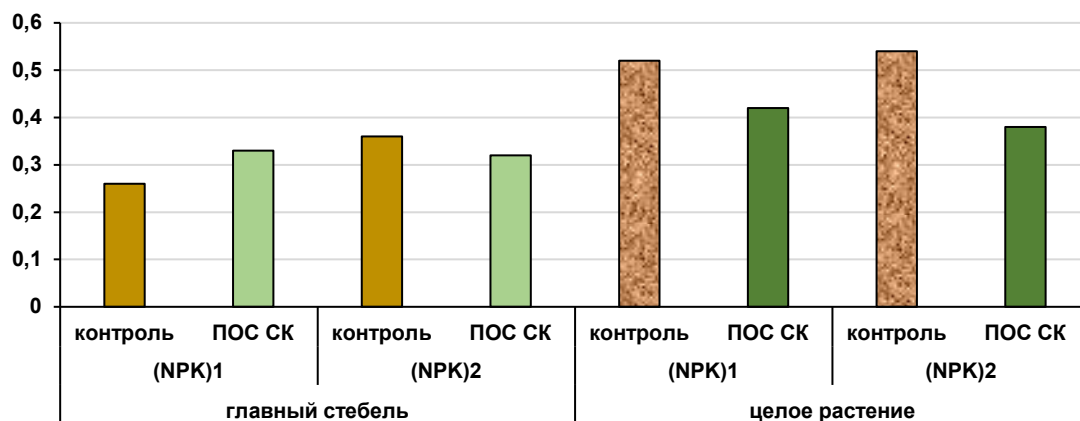


Рис. 4. Масса зерна ячменя на разных фонах питания и ПОС СК, г/растение

Заключение. Проведенные исследования показали значительные различия по содержанию биофильных элементов в исходных семенах и зерне растений, выращенных из этих семян. Зерно исходного семенного материала характеризовалось большим содержанием мезоэлементов (Ca, Mg, S) и меньшим – микроэлементов (Zn, Mn, Cu).

Повышение обеспеченности растений основными минеральными элементами способствовало возрастанию содержания всех элементов в зерне ячменя. Эффективность действия СК зависела от уровня питания. На низком фоне питания поступление всех элементов (кроме железа) в зерно под влиянием СК возрастало. При более высокой обеспеченности NPK СК способствовала увеличению содержания микроэлементов и фосфора, тормозила поступление калия, кальция, серы, и не влияла на количество магния.

ПОС СК оказывала влияние на транспорт элементов из корня проростков в надземную часть и снижала интенсивность окислительных процессов в онтогенезе ячменя, повышала продуктивность главного колоса на низком фоне питания.

Литература

1. Apel K., Hirt H. Reactive oxygen species metabolism, oxidative stress and signal transduction. *Ann. Rev. Plant Biol.* 2004. V. 55. P. 373-384.
2. Pokotylo I., Kravets V., Ruellaud E. Salicylic acid bincling proteins. The hidden forebrou of salicylic acid signaling. *Intern. I. ofmolecular sciences.* 2019. Vol. 20. Art. 4377.
3. Сахабутдинова А.Р., Фатхутдинова Р.А., Фатхутдинова А.Р., Кильдибекова А.Р. и др. Влияние обработки семян салициловой кислотой и фунгицидом фенорам супер на гормональный статус и рост проростков пшеницы // *Агрохимия.* - 2004. - № 4. - С. 17-21.

4. Poore P. Effect of salicylic acid on metabolism of mitochondrial reactive oxygen species in plants. *Biomolecules.* 2020. V. 47. P. 177-197.

5. Saleem M., Fariduddin Q., Yanda T. Multifaceted role of salicylic acid in combating cold stress in plant. *Y. of Plant growth regulation.* 2020. V. 40. P. 464-485.

6. Vlot A.C., Dempsey D.A., Klessig D.F. Salicylic acid a multifaceted hormone to combat disease. *Annual. Rev. of Phytopathology.* 2009. Vol. 47. P. 177-206.

7. Khan N.A., Syced S., Masood A., Nazar R., Yqbal N. Application of salicylic acid enreases contents of nutrents and antioxidaion metabolism in mung bean and abla viates adverse effects of salinity stress. *Inter. J. Plant Biol.* 2010. Vol. 1. P. 1-8.

8. Осипова Л.В., Курносоева Т.Л., Быковская И.А. Влияние минерального питания на физиолого-биохимические параметры яровой пшеницы в критический период развития // *Плодородие.* - 2023. - № 6. - С. 42-46.

9. Ягодин Б.А., Торшин С.П., Кокурин Н.Л., Савидов Н.А. Вариабельность микроэлементного состава зерна основных злаковых культур и факторы, ее определяющие // *Агрохимия.* - 1989. - № 3. - С. 125-133.

10. Сабинин Д.А. Физиологические основы питания растений. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. - 512 с.

11. Westfall C.S., Sherp A.M. Arabidopsis thaliana GH3.5 acyl acid amido synthetase mediates metabolic crosstalk in auxin and salicylic acid homeostasis // *PNAS.* 2016. V. 113. P. 13917.

12. Blanco F. Early genomic responses to salicylic acid in arabidopsis // *Plant molecular biology.* 2009. T. 70. № 1-2. P. 79-102.

13. Сумина А.В., Полонский В.И. Минеральный состав зерна ячменя, выращенного в контрастных климатических условиях Сибири // *Животноводство и кормопроизводство.* - 2020. - № 1. - С. 190-199.

14. Shen C., Yang Y., Liu K., Zhang L., Guo H., Sun T., Wang H. Involvement of endogenous salicylic acid in iron deficiency responses in arabidopsis. *J. Exp. Bot.* 2016. V. 67. № 14. P. 4179-4193.

CONTENT OF BIOPHILIC ELEMENTS IN BARLEY GRAIN DEPENDING ON THE LEVEL OF NUTRITION AND PRETREATMENT WITH SALICYLIC ACID

L.V. Osipova, E.V. Lyubun', T.L. Kurnosova,
I.A. Bykovskaya, E.A. Fyodorova, K.U. Ilchenko

All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov"
(All-Russian Research Institute of Agrochemistry)

12755, Russia, Moscow, Pryanishnikova str., 31A; E-mail: legos4@yandex.ru

The results of studies to determine the initial content of biophilic elements in the seed material of spring barley and the grain of plants grown from these seeds are presented. The effect of cultivation conditions - the provision of basic mineral elements and pre-treatment of initial seeds with salicylic acid (POS SK) on the intake of nutrients, the physiological and biochemical status of plants in certain periods of vegetation and the productivity of barley is shown.

Keywords: spring barley, macro-, meso-, microelements, pre-sowing seed treatment (PIC), salicylic acid.