УДК 633.358:631.81.033:631.51.017 DOI 10.31857/S2500262724050038 EDN SJAYTD

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В РАСТЕНИЯХ ГОРОХА

© 2024 г. **Е. В. Дубовик,** доктор биологических наук, **Д. В. Дубовик,** доктор сельскохозяйственных наук, **А. Н. Морозов,** кандидат сельскохозяйственных наук

Курский федеральный аграрный научный центр,
305021, Курск, ул. Карла Маркса, 70б
E-mail: dubovikdm@yandex.ru

Исследования проводили с целью оценки уровня накопления горохом меди, цинка, марганца, кобальта и железа при использовании различных технологий его возделывания. Работу выполняли в 2020–2023 гг. на черноземе типичном в Курской области. Изучали четыре агротехнологии возделывания гороха, основанные на различных способах основной обработки почвы: традиционную, дифференцированную, минимальную, прямого посева. Содержание меди было наибольшим в корнях при минимальной технологии (13,37 мг/кг), в соломе и семенах – при прямом посеве (6,16 и 5,74 мг/кг). Максимальное в опыте количество цинка в корнях обеспечивали традиционная технология и прямой посев (34,10 и 34,63 мг/кг), в соломе – дифференцированная (13,35 мг/кг), в семенах – традиционная и дифференцированная (28,06 и 28,86 мг/кг) технологии. Наиболее высокое содержание марганца в корнях отмечали при дифференцированной технологии (369,95 мг/кг), в соломе и семенах – при прямом посеве (68,11 и 55,30 мг/кг). Максимальное в опыте количество кобальта в корнях зафиксировано при прямом посеве (7,05 мг/кг), в соломе – при дифференцированной технологии (4,44 мг/кг), в семенах – при минимальной технологии и прямом посеве (3,51 мг/кг). Содержание железа в корнях при традиционной и минимальной технологиях, а также при прямом посеве существенно не различалось, при дифференцированной – снижалось на 16,3…26,0 мг/кг. В соломе гороха наименьшее количество железа было при дифференцированной технологии (270,27 мг/кг). При прямом посеве отмечена наибольшая концентрация железа в зерне (135,7 мг/кг). Коэффициент биологического накопления микроэлементов в семенах был выше, чем в корнях и соломе. Наиболее высокие величины этого показателя в семенах для меди (24,33), марганца (27,68), кобальта (12,14) и железа (9,19) зафиксированы при прямом посеве, для цинка – при дифференцированной (28,36) и минимальной (28,31) технологиях.

THE INFLUENCE OF CULTIVATION TECHNOLOGY ON THE CONTENT OF TRACE ELEMENTS IN PEA PLANTS

E. V. Dubovik, D. V. Dubovik, A. N. Morozov

Federal Agricultural Kursk Research Center,
305021, Kursk, ul. Karla Marksa, 70 b
E-mail: dubovikdm@yandex.ru

The purpose of the research is to assess the level of accumulation of copper, zinc, manganese, cobalt and iron by peas using various cultivation technologies. The work was carried out in 2020–2023 on chernozem typical of the Kursk region. Four agrotechnologies of pea cultivation were studied, based on various methods of basic tillage: traditional, differentiated, minimal, direct sowing. The copper content was highest in the roots with minimal technology (13.37 mg/kg), in straw and grain – with direct sowing (6.16 and 5.74 mg/kg). The maximum amount of zinc in the roots was provided by traditional technology and direct sowing (34.10 and 34.63 mg/kg), in straw – differentiated (13.35 mg/kg), in grain – traditional and differentiated (28.06 and 28.86 mg/kg) technologies. The highest content of manganese in the roots was with differentiated technology (369.95 mg/kg), in straw and grain – with direct sowing (68.11 and 55.30 mg/kg). The maximum amount of cobalt in the roots was observed with direct sowing (7.05 mg/kg), in straw – with differentiated technology (4.44 mg/kg), in grain – with minimal technology and direct sowing (3.51 mg/kg). The iron content in the roots did not differ significantly with traditional, minimal technologies and direct sowing, and with differentiated, it decreased by 16.3…26.0 mg/kg. In pea straw, the lowest amount of iron was found with differentiated technology (270.27 mg/kg). During direct sowing, the highest concentration of iron in the grain was noted (135.7 mg /kg). The coefficient of biological accumulation of trace elements by grain was higher than by roots and straw. The highest values of this grain index for copper (24.33), manganese (27.68), cobalt (12.14) and iron (9.19) were noted with direct sowing, and for zinc – with differentiated (28.36) and minimal (28.31) technologies.

Ключевые слова: *горох посевной (Pisum sativum L.), медь, цинк, марганец, кобальт, железо, технология возделывания, биологическое накопление, баланс.*

Keywords: *seed peas (Pisum sativum L.), copper, zinc, manganese, cobalt, iron, cultivation technology, biological accumulation, balance.*

Одна из наиболее древних продовольственных зернобобовых культур, как в мире, так и в Российской Федерации – горох *(Pisum sativum L.)* [1]. В России за последние годы значительно увеличились как площади посевов этой культуры, так и ее урожайность. В 2023 г. площадь, занятая горохом, составляла порядка 2 млн га, что на 23 % больше, чем в предыдущие годы, а валовой сбор семян превысил 4,7 млн т, или увеличился на 30 % [2]. Повышение спроса на продукцию этой культуры обусловлено ее высокой пищевой ценностью. Помимо высокого содержания белка (23…30 %), семена гороха содержат большое количество макро- и микроэлементов: со 100 г гороха в организм человека поступает в среднем 8 % суточной нормы кальция, 28 % – калия, 37 % – железа, 39 % – магния, 43 % – фосфора, 45 % – цинка, 63 % – марганца, 73 % – меди [3].

Кроме пищевой ценности горох, как сельскохозяйственная культура, имеет большую агрономическую ценность. Клубеньковые бактерии, обитающие на корнях его растений, благодаря симбиотической азотфик-

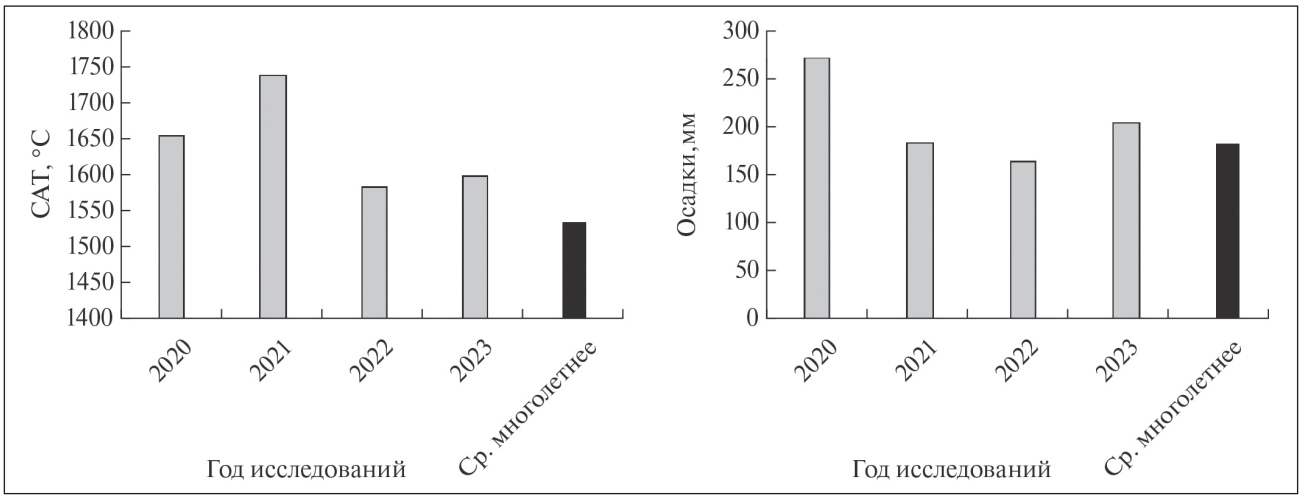

Рис. 1. Сумма активных температур и количество осадков в годы проведения исследований.

сации, обогащают почву азотом [4, 5]. Непродолжительный вегетационный период этой культуры способствует тому, что она служит хорошим предшественником для озимых культур [6].

При этом для получения высоких урожаев семян гороха высокого качества необходима разработка современных технологий возделывания [7]. Агротехнические приемы, составляющие технологии возделывания гороха, оказывая непосредственное влияние на физико-химические процессы, происходящие в почве, определяют уровень накопления микроэлементов в растениях [8, 9, 10]. Данных о влиянии технологии возделывания гороха на уровень содержания микроэлементов в почве и накопление их растениями крайне мало, и зачастую они противоречивы [11, 12].

Цель исследований – оценить уровень накопления горохом меди, цинка, марганца, кобальта и железа в зависимости от технологий его возделывания для их совершенствования.

Методика. Работу выполняли на опытном поле Курского федерального аграрного научного центра (Курская область, Курский район, п. Черемушки) в 2020–2023 гг. в четырехпольном севообороте, развернутом в пространстве и времени, со следующим чередованием культур: горох – озимая пшеница – соя – яровой ячмень.

Изучали четыре агротехнологии возделывания гороха, основанные на различных способах основной обработки почвы: традиционная – вспашка с оборотом пласта на глубину 20…22 см; дифференцированная в севообороте – под горох мелкая (дискование на 8…10 см); минимальная – поверхностная обработка почвы (дискование на 6…8 см); прямой посев – посев сеялкой Дон 114.

Первые три технологии предусматривали основное внесение минеральных удобрений в дозе $N_{15}P_{39}K_{39}$, а также интегрированную систему защиты растений, сочетающие механические обработки и применение химических препаратов. В рамках технологии прямого посева осуществляли основное внесение минеральных удобрений в дозе $N_5P_{13}K_{13}$, припосевное – в дозе $N_{10}P_{26}K_{26}$. Использовали химическую систему защиты растений, которая предусматривала применение гербицидов сплошного действия осенью после уборки предшественника и весной до посева гороха.

Варианты в полевом опыте размещали систематически в один ярус. Площадь посевной делянки 6000 м^2 (60 м × 100 м), повторность трехкратная. Сорт гороха – Ягуар.

Почва опытного участка – чернозем типичный мощный тяжелосуглинистый. В среднем по опыту содержание гумуса в пахотном слое составляло 5,3 %, подвижного фосфора и калия (по Чирикову) – 200 и 127 мг/кг соответственно, азота щелочногидролизуемого (по Корнфилду) – 155 мг/кг. Реакция почвенной среды слабокислая (pH_{KCl} = 5,3 ед.).

Урожайность гороха учитывали при уборке комбайном Сампо-500 с последующим взвешиванием и пересчетом на 14 %-ную влажность и 100 %-ную чистоту. После уборки определяли запасы корневых остатков гороха в пахотном слое, а также количество соломы [13]. Для определения накопления микроэлементов горохом изучено их содержание в различных частях растений – корнях, соломе, зерне.

Валовое содержание микроэлементов в почве (Cu, Zn, Mn, Co, Fe) определяли методом спекания почвы с карбонатом натрия с дальнейшей обработкой HNO_3 (1:1) и H_2O_2 (конц.) и атомно-абсорбционным окончанием [14]. Содержание подвижных соединений микроэлементов в почве определяли в вытяжке ацетатно-аммонийного буфера (ААБ) pH 4,8, соотношение почва: раствор – 1:10. Содержание микроэлементов в семенах, соломе и корнях гороха определяли методом сухого озоления и кислотного сжигания (мокрого озоления) [15]. Все измерения проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре AAS-3.

Статистическую обработку полученных данных осуществляли методами дисперсионного и регрессионного анализов с использованием программ Microsoft Excel и Statistica.

Для оценки интенсивности поступления микроэлементов в растения рассчитывался коэффициент биологического поглощения (КБП), представляющий собой отношение содержания элемента в золе растения (или определенной его части) к валовому содержанию элемента в почве [16].

В годы проведения исследований сумма активных температур (САТ) в 2020 г. превышала среднемноголетнюю норму на 119 °С, в 2021 г. – на 204 °С, в 2022 г. – на 50 °С, в 2023 г. – на 64 °С (рис. 1). Количество выпавших атмосферных осадков в 2020 г. было выше нормы на 91 мм, в 2021 г. – на уровне среднемноголетних значений, в 2022 г. – ниже на 17 мм, в 2023 г. – выше на 22 мм.

Результаты и обсуждение. Применяемые технологии возделывания гороха не оказывали существенного влияния на содержание валовых форм микроэлементов

Табл. 1. Содержание микроэлементов в почве (среднее за 2020–2023 гг.), мг/кг

Технология	Cu	Zn	Mn	Co	Fe
Валовые формы					
Традиционная	8,38±0,16	30,39±0,36	166,5±4,16	11,18±0,32	499,4±4,99
Дифференцированная	8,35±0,11	30,84±0,25	161,5±2,10	10,69±0,27	511,2±1,53
Минимальная	7,53±0,12	30,12±0,21	156,5±4,70	10,92±0,34	511,9±5,12
Прямого посева	8,13±0,11	30,97±0,22	147,8±5,76	9,97±0,42	509,0±8,14
$НСР_{05}$	1,93	1,86	18,81	1,69	20,71
Кларк почвы (К), мг/кг	20	50	850	10	38000
Подвижные формы					
Традиционная	0,40±0,01	1,37±0,05	35,40±1,06	0,43±0,01	260,7±1,30
Дифференцированная	0,40±0,01	1,35±0,04	33,43±0,84	0,47±0,01	259,1±1,55
Минимальная	0,45±0,01	1,33±0,04	31,50±0,41	0,46±0,02	262,8±0,79
Прямого посева	0,48±0,01	1,34±0,06	32,53±0,59	0,50±0,02	262,5±1,31
$НСР_{05}$	0,10	0,18	3,80	0,05	3,11

в почве. Количество меди было ниже кларка (К) почвы [17] в 2,5 раза, цинка – в 1,6 раза, марганца – в 5,4 раза, железа – в 74,8 раза (табл. 1). Содержание валового кобальта в почве находилось на уровне кларка. Содержание подвижных форм микроэлементов в почве, в зависимости от технологии, также существенно не изменялось.

Наиболее высокое в опыте накопление меди отмечено в корнях гороха (табл. 2). Ее максимальное содержание зафиксировано при минимальной технологии (13,37 мг/кг). При возделывании гороха по традиционной технологии величина этого показателя снижалась на 1,40 мг/кг, по дифференцированной – на 1,26 мг/кг, при прямом посеве – на 0,70 мг/кг.

Содержание меди в соломе гороха было в среднем в 2,2 раза ниже, чем в корнях. По мере минимизации технологии происходило повышение ее концентрации с максимумом при прямом посеве (6,16 мг/кг). При традиционной технологии величина этого показателя снижалась на 0,56 мг/кг, при дифференцированной – на 0,77 мг/кг, при минимальной – на 0,35 мг/кг.

Семена гороха накапливали меньше меди, чем корни, в 2,4 раза, солома – в 1,1 раза. Отмечен рост содержания меди в семенах от традиционной технологии к дифференцированной (+0,70 мг/кг), минимальной (+1,26 мг/кг) и прямому посеву (+1,40 мг/кг).

Накопление меди корнями растений обусловлено меньшей подвижностью этого элемента в надземных частях растений, а также способностью корней удерживать медь от переноса в вегетирующие побеги [18].

Наибольшее в опыте содержание цинка зафиксировано в корнях гороха. Здесь его количество было выше, чем в соломе, в 3,0 раза, в семенах – в 1,2 раза. Вероятно, такой характер накопления этого элемента обусловлен тем, что выделяемые корнями гороха экссудаты могут участвовать в мобилизации почвенных форм цинка путем его связывания в комплексы, облегчающие диффузию катионов Zn^{2+} к корням [19].

Традиционная технология и прямой посев по уровню накопления цинка корнями существенно не различались, его количество варьировало в пределах 34,10…34,63 мг/кг. Минимальное в опыте содержание этого элемента в корнях отмечено при дифференцированной обработке (29,88 мг/кг).

Количество цинка в соломе в зависимости от применяемой технологии имело обратную связь с его содержанием в корнях (r = –0,98). Меньшее количество цинка в соломе отмечено при прямом посеве и традиционной технологии (8,99…9,65 мг/кг), большее – при дифференцированной (13,35 мг/кг).

По содержанию цинка в семенах традиционная, дифференцированная и минимальная технологии существенно не различались. Величина этого показателя составляла 27,28…28,86 мг/кг. Минимальным в опыте уровнем накопления цинка характеризовались семена, выращенные на фоне прямого посева (24,86 мг/кг).

Наибольшее содержание марганца в горохе отмечали в корнях: выше в среднем в 5,8 раза, чем в соломе, и в 7,5 раза, чем в семенах, что вызвано акропетальным характером распределения этого элемента [20].

При дифференцированной технологии зафиксировано самое высокое количество марганца в корнях. Относительно нее на фоне традиционной технологии величина этого показателя снижалась на 13,09 мг/кг. Минимизация технологий возделывания гороха способствовала значительному снижению содержания марганца в корнях: при минимальной технологии на 39,13 мг/кг, при прямом посеве – на 44,45 мг/кг.

В то же время при минимальной технологии и прямом посеве, по сравнению с традиционной и дифференцированной технологиями, отмечено повышение уровня

Табл. 2. Содержание микроэлементов в частях растений гороха (среднее за 2020–2023 гг.), мг/кг абсолютно сухого вещества

Технология	Cu	Zn	Mn	Co	Fe
Корни					
Традиционная	11,97±0,44	34,10±0,58	356,86±4,28	5,97±0,23	974,96±13,65
Дифференцированная	12,11±0,21	29,88±0,66	369,95±4,81	6,72±0,27	958,65±22,05
Минимальная	13,37±0,13	31,18±0,28	330,82±4,30	6,83±0,30	984,62±5,91
Прямого посева	12,67±0,15	34,63±0,62	325,50±3,58	7,05±0,33	984,55±3,94
$НСР_{05}$	0,64	3,55	12,82	0,52	13,77
Солома					
Традиционная	5,60±0,03	9,65±0,34	53,48±1,07	3,48±0,13	296,94±10,99
Дифференцированная	5,39±0,16	13,35±0,31	53,55±1,29	4,44±0,12	270,27±4,86
Минимальная	5,81±0,04	11,47±0,41	63,70±1,27	3,71±0,16	312,69±4,06
Прямого посева	6,16±0,07	8,99±0,31	68,11±1,02	4,11±0,16	320,04±5,12
$НСР_{05}$	0,29	1,21	3,64	0,37	14,62
Семена					
Традиционная	4,34±0,10	28,06±0,31	48,23±1,45	2,67±0,11	116,13±1,39
Дифференцированная	5,04±0,07	28,86±0,43	45,36±1,41	2,95±0,06	109,97±1,21
Минимальная	5,60±0,09	27,28±0,87	36,75±0,92	3,51±0,12	107,45±0,97
Прямого посева	5,74±0,09	24,86±0,32	55,30±1,38	3,51±0,15	135,73±3,53
$НСР_{05}$	0,44	1,62	4,71	0,46	15,81

марганца в соломе на 10,2 и 14,6 мг/кг. Между содержанием марганца в корнях и соломе гороха установлена весьма высокая обратная связь (r = –0,96).

В семенах гороха количество марганца в среднем было меньше, чем в соломе, в 1,3 раза. Максимальным в опыте уровнем накопления этого элемента в семенах характеризовалась продукция, выращенная по технологии прямого посева (55,30 мг/кг), наименьшим – по минимальной технологии (36,75 мг/кг). Традиционная и дифференцированная технологии по количеству марганца в семенах существенно не различались.

Наиболее высокая концентрация кобальта отмечена в корнях гороха, в среднем выше в 1,7 раза, чем в соломе, и в 2,1 раза, чем в семенах. Минимизация технологии способствовала повышению содержания кобальта в корнях. Так, по сравнению с традиционной, при дифференцированной технологии оно возросло на 0,75 мг/кг, при минимальной – на 0,86 мг/кг, при прямом посеве – на 1,08 мг/кг.

В соломе гороха наименьшее количество кобальта отмечено при традиционной (3,48 мг/кг), а наибольшее – при дифференцированной технологии (4,44 мг/кг). Содержание кобальта в семенах гороха при традиционной и дифференцированной технологиях существенно не различалось и варьировало в пределах 2,67…2,95 мг/кг. При переходе на минимальную технологию и прямой посев оно повышалось на 0,56…0,84 мг/кг.

Железо наиболее интенсивно накапливали корни гороха, где его содержание было выше, чем в соломе, в 3,3 раза, а по сравнению с семенами – в 8,3 раза. Такой характер распределения этого элемента обусловлен тем, что его поглощение растениями начинается в апопласте эпидермальных клеток корня. В аэробных условиях железо окисляется и осаждается в форме нерастворимых солей, формируя так называемый апопластный пул, в котором концентрируется до 95 % этого элемента, содержащегося в корне [21]. Величины этого показателя при традиционной и минимальной технологиях, а также прямом посеве существенно не различались, его количество варьировало в пределах 975,0…984,6 мг/кг, а при дифференцированной технологии снижалось на 16,3…26,0 мг/кг.

Наименьшее содержание железа в соломе гороха отмечали при возделывании культуры по дифференцированной технологии (270,27 мг/кг). Переход на минимальную технологию и прямой посев сопровождался повышением величины этого показателя соответственно на 15,75 и 23,1 мг/кг, относительно традиционной технологии.

Количество железа в семенах гороха при традиционной, дифференцированной и минимальной технологиях существенно не различалось и составляло 107,45…116,13 мг/кг. При прямом посеве наблюдали значительное повышение величины этого показателя на 19,60…28,28 мг/кг.

Для расчета коэффициентов биологического поглощения (КБП) изучаемых микроэлементов было определено их содержание в золе гороха (табл. 3). Наиболее высокой зольностью характеризовались корни растений – в среднем 49,3 %, что выше, чем в соломе, в 5,0 раз, по сравнению с семенами – в 15,4 раза.

Содержание в золе корней меди при традиционной и минимальной технологиях существенно не различалось и было выше, чем при дифференцированной, на 2,26…2,76 мг/кг, а по сравнению с прямым посевом – на 1,36…1,86 мг/кг. Наиболее высокую концентрацию меди в золе соломы гороха отмечали при прямом посеве (62,83 мг/кг), что выше, чем при традиционной технологии, на 5,07 мг/кг, дифференцированной – на 8,36 мг/кг, минимальной – на 4,11 мг/кг. Содержание меди в золе семян повышалось по мере снижения интенсивности технологии. По сравнению с традиционной технологией, ее количество увеличивалось при дифференцированной – на 25,00 мг/кг, при минимальной – на 47,36 мг/кг и при прямом посеве – на 70,10 мг/кг.

Табл. 3. Содержание микроэлементов в золе растений гороха (среднее за 2020–2023 гг.), мг/кг золы

Технология	Зола, % от сухого вещества	Cu	Zn	Mn	Co	Fe
Корни						
Традиционная	45,6	26,25	74,77	782,58	13,10	2138,08
Дифференцированная	50,5	23,99	59,17	732,58	13,31	1898,32
Минимальная	50,0	26,75	62,36	661,63	13,66	1969,25
Прямого посева	50,9	24,89	68,04	639,49	13,85	1934,28
$НСР_{05}$	2,5	1,56	2,31	12,24	0,53	38,86
Солома						
Традиционная	9,7	57,76	99,50	551,37	35,85	3061,24
Дифференцированная	9,9	54,47	134,82	540,91	44,88	2730,00
Минимальная	9,9	58,72	115,90	643,41	37,50	3158,48
Прямого посева	9,8	62,83	91,71	694,97	41,91	3265,71
$НСР_{05}$	0,3	2,72	13,43	25,58	1,71	48,97
Семена						
Традиционная	3,4	127,73	825,18	1418,61	78,56	3415,59
Дифференцированная	3,3	152,73	874,62	1374,55	89,35	3332,51
Минимальная	3,2	175,09	852,60	1148,44	109,73	3357,90
Прямого посева	2,9	197,83	857,38	1906,80	121,08	4680,25
$НСР_{05}$	0,3	8,11	18,46	28,91	5,11	35,61

Максимальное в опыте содержание цинка в золе корней отмечено при традиционной технологии (74,77 мг/кг), а минимальное – при дифференцированной (59,17 мг/кг). В золе соломы гороха наиболее высокое содержание этого элемента отмечено при дифференцированной технологии – 134,82 мг/кг, что выше, чем при традиционной, на 35,32 мг/кг, при минимальной – на 18,92 мг/кг и при прямом посеве – на 43,11 мг/кг. По количеству цинка в золе семян минимальная технология и прямой посев существенно не различались. По сравнению с ними, при дифференцированной технологии отмечено повышение величины этого показателя на 17,24…22,02 мг/кг, а при традиционной – снижение на 27,42…32,20 мг/кг.

Содержание марганца в золе корней снижалось от традиционной технологии к прямому посеву на 50,00…143,09 мг/кг. Максимальное в опыте количество этого элемента в золе соломы зафиксировано при прямом посеве (694,97 мг/кг), минимальное – при дифференцированной технологии (540,91 мг/кг). В золе семян гороха самая высокая концентрация марганца отмечена при прямом посеве (1906,80 мг/кг), что выше, чем при традиционной технологии, в 1,34 раза, при дифференцированной – в 1,39 раза, при минимальной – в 1,66 раза.

Количество кобальта в золе корней постепенно повышалось от традиционной технологии к прямому посеву на 0,21…0,75 мг/кг. В золе соломы максимальное в опыте его содержание отмечено при дифференцированной технологии (44,88 мг/кг), а минимальное – при традиционной (35,85 мг/кг). В золе семян гороха концентрация кобальта увеличивалась по мере снижения интенсивности технологии на 10,79…42,52 мг/кг.

Наибольшее содержание железа в золе корней гороха отмечено при традиционной технологии (2138,08 мг/кг). В золе соломы оно достигало максимума при прямом посеве (3265,71 мг/кг), что выше, чем при традиционной технологии, на 2447 мг/кг, при дифференцированной –

Табл. 4. Коэффициенты биологического поглощения микроэлементов растениями гороха (среднее за 2020–2023 гг.)

Технология	Cu	Zn	Mn	Co	Fe
Корни					
Традиционная	3,13	2,46	4,70	1,17	4,28
Дифференцированная	2,87	1,92	4,54	1,24	3,71
Минимальная	3,55	2,07	4,23	1,25	3,85
Прямого посева	3,06	2,20	4,33	1,39	3,80
$НСР_{05}$	0,17	0,13	0,19	0,14	0,10
Солома					
Традиционная	6,89	3,27	3,31	3,21	6,13
Дифференцированная	6,52	4,37	3,35	4,20	5,34
Минимальная	7,80	3,85	4,11	3,43	6,17
Прямого посева	7,73	2,96	4,70	4,20	6,42
$НСР_{05}$	0,15	0,12	0,16	0,17	0,29
Семена					
Традиционная	15,24	27,15	8,52	7,03	6,84
Дифференцированная	18,29	28,36	8,51	8,36	6,52
Минимальная	23,25	28,31	7,34	10,05	6,56
Прямого посева	24,33	27,68	12,90	12,14	9,19
$НСР_{05}$	0,82	0,16	1,14	1,08	1,04

на 535,71, при минимальной технологии – 107,23 мг/кг. Наибольшее содержание железа в золе семян зафиксировано при прямом посеве (4680,25 мг/кг), наименьшее – при дифференцированной технологии (3332,51 мг/кг).

Величина КБП всех изучаемых в опыте микроэлементы превышала 1 (табл. 4), что позволяет отнести их к группе сильного и энергичного накопления, для которой характерна биофильная аккумуляция [22].

КБП меди корнями гороха достигал максимума в опыте при минимальной технологии, а минимума – при дифференцированной. Кроме того, при дифференцированной технологии отмечен наименьший КБП меди в соломе (6,52). Минимальная технология и прямой посев обеспечили рост КБП этого элемента относительно традиционной технологии соответственно на 0,91 и 0,84 ед. В семенах гороха отмечен рост КБП по мере снижения интенсивности технологии. Так, по сравнению с традиционной, при дифференцированной технологии он увеличился на 3,05 ед., при минимальной – на 8,01 ед., при прямом посеве – на 9,09 ед. В среднем КБП меди для семян гороха был выше, чем для корней, в 6,4 раза, для соломы – в 2,8 раза.

Максимальный в опыте КБП цинка для корней гороха зафиксирован при традиционной технологии (2,46), что на 0,26…0,54 ед. выше, чем при других изучаемых технологиях. Увеличение КБП цинка соломой отмечено при дифференцированной технологии, по сравнению с традиционной, в 1,3 раза, минимальной – в 1,1 раза, прямым посевом – в 1,5 раза. В семенах гороха цинка накапливалось в 12,9 раза больше, чем в корнях, и в 7,7 раза больше, чем в соломе.

КБП марганца для корней гороха был самым высоким при традиционной технологии (4,70), а самым низким – при минимальной (4,23). В соломе культуры повышение КБП этого элемента от традиционной технологии к прямому посеву составляло от 0,04 до 1,39 ед. Для семян гороха максимальный в опыте КБП марганца отмечен при прямом посеве (12,90 ед.), что выше, чем при других технологиях, в 1,5…1,8 раза. КБП этого элемента для семян был в 2,1 раза выше, чем для корней, и в 2,4 раза, чем для соломы.

Максимальный в опыте КБП кобальта для корней гороха фиксировали при прямом посеве (1,39), что выше, чем при остальных технологиях, на 0,14…0,22 ед. Для соломы КБП этого элемента был наиболее высоким при дифференцированной технологии и прямом посеве (4,20). Для семян гороха отмечен рост КБП от традиционной технологии к прямому посеву в 1,2…1,7 раза. Биологическое накопление кобальта в семенах было самым высоким – больше, чем в корнях, в 7,5 раза, по сравнению с соломой – в 2,5 раза.

Усиление биологического поглощения железа корнями гороха выявлено при традиционной технологии на 0,43…0,57 ед. относительно других применяемых технологий. Для соломы наименьший КБП отмечен при дифференцированной технологии (5,34), при других технологиях он был значительно выше и изменялся несущественно (6,13…6,42). Наибольший уровень биологического накопления железа фиксировали в семенах гороха – выше, чем в корнях, в 1,9 раза, по сравнению с соломой – в 1,2 раза. При этом рост КБП на фоне прямого посева, по сравнению с другими технологиями, составлял 1,3…1,4 раза.

С учетом продуктивности гороха и содержания химических элементов в различных частях растений были рассчитаны их запасы (табл. 5). Накопление корнями меди относительно традиционной технологии при дифференцированной снижалось на 2,6 %, а при прямом посеве и минимальной технологии повышалось соответственно на 2,6 и 7,7 %.

Дифференцированная и минимальная технологии способствовали снижению запасов меди в соломе на 11,8 и 5,9 %, по сравнению с традиционной технологией и прямым посевом. Уровень запасов меди в семенах при минимизации технологии возрастал на 20…30 %.

Накопление корнями цинка при традиционной технологии и прямом посеве находилось на одном уровне, а при дифференцированной и минимальной – снижалось на 11,8 и 14,5 % соответственно. В соломе наибольшее количество этого элемента накапливалось при дифференцированной технологии, а наименьшее – при прямом посеве. В семенах отмечено постепенное снижение накопления цинка от традиционной технологии к прямому посеву на 4,8…8,1 %.

Наиболее интенсивное накопление марганца корнями наблюдали при дифференцированной технологии, а наименьшее – при минимальной. Максимальное его накопление соломой обеспечил прямой посев – на 11,7…31,7 % больше, чем при других технологиях. В семенах оно было наименьшим при минимальной технологии, а наибольшим – при прямом посеве.

Накопление кобальта в корнях имело тенденцию к повышению от традиционной технологии к прямому посеву на 10,5…15,8 %. В соломе при дифференцированной технологии и прямом посеве оно находилось на одном уровне, а при традиционной и минимальной технологиях снижалось на 8,3 и 16,7 % соответственно. В семенах накопление этого элемента увеличивалось от традиционной технологии к прямому посеву на 16,6…33,3 %.

Табл. 5. Накопление микроэлементов растениями гороха (среднее за 2020-2023 гг.)

Технология	Масса,	Содержание микроэлементов, кг/га				
	т/га	Cu	Zn	Mn	Co	Fe
Корни						
Традиционная	3,23	0,039	0,110	1,153	0,019	3,149
Дифференцированная	3,14	0,038	0,094	1,162	0,021	3,010
Минимальная	3,12	0,042	0,097	1,032	0,021	3,072
Прямого посева	3,19	0,040	0,110	1,038	0,022	3,141
Солома						
Традиционная	3,11	0,017	0,030	0,166	0,011	0,923
Дифференцированная	2,71	0,015	0,036	0,145	0,012	0,732
Минимальная	2,69	0,016	0,031	0,171	0,010	0,841
Прямого посева	2,80	0,017	0,025	0,191	0,012	0,896
Семена						
Традиционная	2,21	0,010	0,062	0,107	0,006	0,257
Дифференцированная	2,06	0,010	0,059	0,093	0,006	0,227
Минимальная	2,12	0,012	0,058	0,078	0,007	0,228
Прямого посева	2,31	0,013	0,057	0,128	0,008	0,314

Накопление железа в корнях в зависимости от технологии изменялось незначительно – на уровне 2,4…4,4 %. Самым высоким в соломе оно было при традиционной, а самым низким – при дифференцированной технологии. Накопление железа семенами при традиционной и минимальной технологиях снижалось на 11,3…11,7 %, а при прямом посеве повышалось на 22,2 %, по сравнению с традиционной технологией.

Выводы. Технология возделывания гороха не оказывала существенного влияния на содержание валовых и подвижных форм микроэлементов в почве. Наиболее высокое в опыте содержание изученных микроэлементов отмечено в корнях гороха, а наименьшее, за исключением цинка, – в семенах.

В корнях гороха максимальное содержание меди было при использовании минимальной технологии (13,37 мг/кг). По уровню накопления корнями цинка традиционная технология и прямой посев существенно не различались (34,10…34,63 мг/кг) и имели преимущество перед дифференцированной технологией (29,88 мг/кг). Самое высокое количество марганца в корнях отмечено при дифференцированной технологии. Минимизация технологий способствовала уменьшению его содержания на 39,13…44,45 мг/кг. Максимальное в опыте количество кобальта в корнях гороха обеспечила технология прямого посева. Содержание железа в корнях при традиционной и минимальной технологиях, а также прямом посеве существенно не различалось, а при дифференцированной – снижалось на 16,3…26,0 мг/кг.

В соломе гороха по мере минимизации технологии концентрация меди возрастала до максимума в опыте при прямом посеве (6,16 мг/кг). Наименьшее количество цинка в соломе отмечено при прямом посеве (8,99 мг/кг), а наибольшее – при дифференцированной технологии (13,35 мг/кг). При минимальной технологии и прямом посеве, по сравнению с традиционной и дифференцированной технологиями, в соломе происходило повышение уровня марганца на 10,2 и 14,6 мг/кг. Количество кобальта в соломе было наименьшим при традиционной технологии (3,48 мг/кг), а наибольшим – при дифференцированной (4,44 мг/кг). Меньше всего железа в соломе гороха отмечали при его возделывании по дифференцированной технологии (270,27 мг/кг).

В семенах гороха рост содержания меди от традиционной технологии к прямому посеву составлял 0,7…1,4 мг/кг. Минимальное количество цинка выявлено в семенах, выращенных при прямом посеве (24,86 мг/кг). Наибольший уровень марганца в семенах отмечен при прямом посеве (55,30 мг/кг), наименьший – при минимальной технологии (36,75 мг/кг). Содержание кобальта в семенах при традиционной и дифференцированной технологиях существенно не различалось, а при переходе на минимальную технологию и прямой посев повышалось на 0,56…0,84 мг/кг. При прямом посеве отмечено повышение концентрации железа в семенах на 19,60…28,28 мг/кг.

Коэффициент биологического накопления микроэлементов для семян выше, чем для корней и соломы: для меди – в 6,4 и 2,8 раза, для цинка – в 12,9 и 7,7 раза, для марганца – в 2,1 и 2,4 раза, для кобальта – в 7,5 и 2,5 раза, для железа – в 1,9 и 1,2 раза соответственно. Более высокие КБП меди, марганца, кобальта и железа для семян гороха отмечены при прямом посеве, цинка – при дифференцированной и минимальной технологиях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр» по теме государственного задания № FGZU-2024-0001. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство этим конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. *Ludvíková M., Griga M. Pea transformation: History, current status and challenges // Czech Journal of Genetics and Plant Breeding. 2022. No. 3. P. 127–161. doi: 10.17221/24/2022-CJGPB.*
2. *Горох. Посевные площади, валовые сборы и урожайность в 2023 году // Экспертно-аналитический центр агробизнеса «АБ-Центр» www.ab-centre.ru. URL: https://ab-centre.ru/news/goroh-posevnye-ploschadi-valovye-sbory-i-urozhaynost-v-2023-godu (дата обращения: 21.06.2024).*
3. *Hacisalihoglu G., Beisel N. S. Characterization of pea seed nutritional value within a diverse population of Pisum sativum // PLoS One. 2021. No. 4. e. 0259565. URL: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0259565 (дата обращения: 01.06.2024). doi: 10.1371/journal.pone.0259565.*
4. *Симбиотическая фиксация атмосферного азота у бобовых растений как генетико-селекционный признак / К. К. Сидорова, М. Н. Гляненко, Т. М. Мищенко и др. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2015. № 19 (1). С. 50–57.*
5. *Field Pea in European Cropping Systems: Adaptability, Biological Nitrogen Fixation and Cultivation Practices / A. Karkanis, G. Ntatsi, Ch- K. Kontopoulou, et al. // Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 2016. Vol. 44. No. 2. P 325–336. doi: 10.15835/nbha44210618.*
6. *Попов А. С. Влагообеспеченность посевов твердой озимой пшеницы при возделывании по различным предшественникам // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 11. С. 10–13. doi: 10.24411/0235-2451-2019-11102.*
7. *Вошедский Н. Н., Кулыгин В. А. Влияние элементов технологии возделывания на урожайность новых сортов гороха в богарных условиях Ростовской области // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 8. С. 14–19. doi: 10.53859/02352451_2021_35_8_14.*
8. *Труфанова А. А. Оценка качества фитомассы гороха при внесении традиционных комплексных удобрений и акваринов // Вестник КрасГА У. 2022. № 3. С. 79–86. doi: 10.36718/1819-4036-2022-3-79-86.*
9. *Зубкова Т. В., Мотылева С. М., Виноградов Д. В. Исследование влияния органических и минеральных удобрений на урожайность рапса и зольный состав его маслосемян // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 1 (57). С. 77–84.*
10. *Дубовик Д. В., Дубовик Е. В., Морозов А. Н. Микроэлементы в яровом ячмене в зависимости от способа основной обработки почвы // Земледелие. 2023. № 7. С. 11–15.*
11. *Arslan M. Variation of some seed trace element contents in Grass Pea (Lanhyrus sativus L.) genotypes from Turkey // Fresenius Environmental Bulletin. 2017. Vol. 26. No. 5. P. 3676–3684.*
12. *Photosynthesis, yielding and quality of pea seeds depending on the row spacing and sowing density / R. E. Tobiasz-*

Salach, M. Jańczak-Pieniążek, D. Bobrecka-Jamro, et al. // Journal of Water and Land Development. 2022. Special Issue. P. 146–155. doi: 10.24425/jwld.2022.143730.
13. *Васильев И. П., Туликов А. М., Баздырев Г. И. Практикум по земледелию. М.: КолосС, 2004. 424 с.*
14. *Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства / А. В. Кузнецов, А. П. Фесон, С. Г. Самохвалов и др. М.: Изд-во ЦИНАО, 1992. 61 с.*
15. *Практикум по агрохимии / В. Г. Минеев, В. Г. Сычев, О. А. Амельянчик и др. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.*
16. *Добровольский В. В. Основы биогеохимии. М.: Изд-во Академия, 2003. 400 с.*
17. *Дьяченко В. В., Матасова И. Ю. Региональные кларки химических элементов в почвах Европейской части юга России // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1159–1166. doi: 10.7868/S0032180X16100063.*
18. *Transcriptome analysis shows that alkalinity affects metabolism in the roots of Mesembryanthemum crystallinum / Y. X. Hei, J. Liu, Z. X. Zhang, et al. // Biologia plantarum. 2023. Vol. 67. P. 114–125. doi: 10.32615/bp.2023.009.*
19. *Impact of zinc and iron agronomic biofortification on grain mineral concentration of finger millet varieties as affected by location and slope / D. Teklu, D. Gashu, E. J. M. Joy, et al. // Frontiers in Nutrition. 2023. Vol. 10. P. 1159833. URL: https://www.frontiersin.org/journals/nutrition/articles/10.3389/fnut.2023.1159833/full (дата обращения: 01.06.2024). doi: 10.3389/fnut.2023.1159833.*
20. *Витковская С. Е., Яковлев О. Н. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение марганца и железа в системе почва – растение // Агрохимия. 2017. № 11. С. 44–51. doi: 10.7868/S0002188117110059.*
21. *Excessive iron accumulation in the pea mutants dgl and brz: subcellular localization of iron and ferritin / R. Becker, R. Manteuffel, D. Neumann, et al. // Planta. 1998. Vol. 207. P. 217–223. doi: 10.1007/s004250050475.*
22. *Лукин С. В. Оценка макро- и микроэлементного состава растений гороха, белого люпина и сои // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 6. С. 76–79. doi: 10.30850/vrsn/2018/6/76-79.*

Поступила в редакцию 31.07.2024
После доработки 16.09.2024
Принята к публикации 08.10.2024