

ВЛИЯНИЕ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ НА УРОЖАЙНОСТЬ ЯЧМЕНЯ И ОКУПАЕМОСТЬ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

В. В. Лапа, В. В. Гракун, С. С. Хмелевский, Г. В. Пироговская, В. И. Сороко

Институт почвоведения и агрохимии, г. Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

Применение удобрений на дерново-подзолистых почвах является важнейшим фактором формирования урожайности сельскохозяйственных культур. Интенсивное применение удобрений двукратно увеличило запас элементов питания. При достигнутом в настоящее время уровне плодородия пахотных почв за счет минеральных удобрений формируется около 50 % урожайности сельскохозяйственных культур [1–5].

Чем лучше агрохимические и агрофизические свойства почв, тем более высокий уровень урожайности сельскохозяйственных культур может быть сформирован. Кроме того, уровень плодородия почв в значительной степени определяет устойчивость сельскохозяйственных культур к неблагоприятным погодным условиям, что очень актуально для растениеводческой отрасли сельского хозяйства. Однако процесс повышения плодородия почв достаточно длительный, поэтому основным резервом увеличения урожайности сельскохозяйственных культур является повышение эффективности применяемых удобрений.

Величину урожайности возделываемых культур определяет уровень применяемых доз минеральных удобрений и сбалансированность вносимых в почву элементов питания. При этом соотношение элементов питания в соответствии с биологическими особенностями растений имеет не меньшее значение, чем величина применяемых доз минеральных удобрений. Каждый из элементов питания оказывает специфическое действие на продукционные процессы растений, недостаток любого из них нельзя заменить избытком другого элемента. Однако в силу различных причин этот принцип в практической деятельности хозяйств чаще всего нарушается. Это может негативно сказываться на эффективности растениеводства. Так, российскими исследователями установлено, что возделывание сельскохозяйственных культур без применения калийных или фосфорных удобрений наряду со снижением урожайности ведет к скрытой деградации и ежегодной потере подвижных форм этих элементов от 2 до 7 мг на кг почвы [1]. Отмечается, что основным требованием к системе удобрения является повышение эффективности применяемых удобрений с учетом потенциала почвенного плодородия [2, 3].

Цель исследований – определить степень влияния различных вариантов несбалансированности элементов питания с вносимыми минеральными удобрениями на величину снижения урожайности ячменя и окупаемость применяемых доз минеральных удобрений прибавкой урожайности зерна.

МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования по определению агрономической эффективности систем удобрения различного уровня сбалансированности проводились в 2023–2024 гг. на опытном поле института в ОАО «Гастелловское» Минского района Минской области. Почва опытного участка дерново-подзолистая легкосуглинистая. Агрохимическая характеристика пахотного слоя почв (0–25 см) перед закладкой опытов была следующая: pH – 5,72–6,09, P₂O₅ – 274–288 мг/кг почвы; K₂O – 262–296 мг/кг почвы; CaO – 956–1204; MgO – 159–208 мг/кг почвы; содержание гумуса – 2,33–2,64 %.

Общий размер делянки – 27 м², повторность вариантов – 4-кратная, предшественники ярового ячменя в 2023 г. – горох, в 2024 г. – горох-овсяная смесь.

Закладку и проведение опытов выполняли в соответствии с технологическими регламентами возделывания. Карбамид стандартный, аммонизированный суперфосфат и калий хлористый вносили в предпосевную культивацию. Обработка посевов против сорняков, вредителей и болезней осуществлялась препаратами, которые внесены в «Государственный реестр средств защиты растений и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь» [6]. Исследования проводили согласно существующим методикам по закладке полевых опытов [7–9].

Почвенные образцы отбирали в полевых опытах из пахотного горизонта почвы, в которых определяли изучаемые показатели следующими методами:

- гумус – по методу И. В. Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-84);
- обменная кислотность pH_{KCl} – потенциометрический (ГОСТ 26483-85);
- содержание подвижного фосфора – по Кирсанову на фотоэлектроколориметре (ГОСТ 26207-84);
- содержание подвижного калия – по Кирсанову на пламенном фотометре (ГОСТ 280207-84);
- кальций и магний – на атомно-абсорбционном спектрофотометре;
- отбор проб – ГОСТ 26483-85;

Отбор растительных образцов и их анализ проводили согласно существующих ГОСТ и ОСТ:

- отбор проб – ГОСТ 18691-83;
- определение азота, фосфора, калия, кальция, магния после мокрого озоления (смесью серной кислоты и перекиси водорода) общепринятыми методами: азот – ГОСТ 13496.4-93 п. 2; фосфор – спектрофотометрически; калий – на пламенном фотометре; кальций – ГОСТ 26570-95; магний – ГОСТ 30502-97 на атомно-адсорбционном спектрофотометре.

Гидротермический коэффициент (ГТК) определялся по формуле Г. Т. Селянинова:

$$\text{ГТК} = (\Sigma X * 10) / \Sigma T,$$

где ΣX – сумма атмосферных осадков за период;

ΣT – сумма положительных температур воздуха за тот же период.

Статистическая обработка результатов исследований проведена по Б. А. Доспехову [9] с использованием соответствующих программ дисперсионного анализа на персональном компьютере, наименьшая существенная разность рассчитывалась с помощью компьютерной программы Excel.

Влагообеспеченность растений ячменя в течение вегетационных периодов возделывания оценивалась по гидротермическому коэффициенту (ГТК).

Количество выпавших атмосферных осадков (с апреля по август), по данным Гидрометеоцентра [10], приведено в таблице 1. Опыт расположен в 5 км от городской черты, ГТК приведен за 5–8 месяц, так как ячмень убирали в августе.

Гидротермический коэффициент (ГТК) в период вегетации ячменя в 2023 г. за май–август составил 1,38, а в 2024 г. – 1,51, что позволяет считать вегетационные периоды 2023 и 2024 гг. близкими к оптимальным. При показаниях ГТК больше 1,6 год считается влажным при, 1,3–1,6 – оптимальным [11].

Следует отметить, что среднемноголетнее значение ГТК за 1991–2020 гг. за этот же период составило 1,56 (табл. 1).

Таблица 1

**Сумма положительных температур воздуха, количество атмосферных осадков и гидротермический коэффициент за период апрель–август 2022–2024 гг.
(ОАО «Гастелловское» Минского района Минской области)**

Год	Показатели	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	За 4–8 месяц
2023	Осадки, мм	37	7	45	150	85	287
	t °C	7,5	12,1	17,8	18	19,8	16,9
	Сумма t > 5–10 °C	225	375,1	534	558	613,8	2080,9
	ГТК	–	0,19	0,84	2,69	1,38	1,38
2024	Осадки, мм	111	54	84	167	28	333
	t °C	9,1	14	18,2	20,2	19,3	17,9
	Сумма t > 5–10 °C	273	434	546	626,2	598,3	2204,5
	ГТК	–	1,24	1,54	2,67	0,47	1,51
Среднемноголетнее за 1991–2020 гг. по г. Минску	Осадки, мм	43,1	65,8	79,2	97,5	71,0	313,5
	t °C	7,3	12,9	16,5	18,5	17,6	16,4
	Сумма t > 5–10 °C	219,0	399,9	495,0	573,5	545,6	2014,0
	ГТК	–	1,65	1,60	1,70	1,30	1,56

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Урожайность ячменя Корнет, возделываемого на дерново-подзолистой легко-суглинистой почве в условиях вегетационного периода в 2023 г. была достаточно высокой: на контроле – 34,3 ц/га зерна, при внесении различных доз минеральных удобрений – 42,9–58,5 ц/га (прибавка к контролю – от 8,6 до 24,2 ц/га). Максимальная урожайность 58,5 ц/га зерна ячменя получена в варианте с внесением азотных, фосфорных и калийных удобрений в дозе $N_{60}P_{60}K_{150}$ в основное внесение с последующей подкормкой в фазу второго узла (стадия 32 по ВВСН) азотом (N_{30}) и микроэлементами в виде хелатов в дозах 50 г по действующему веществу ($Cu_{0,05}Mn_{0,05}$). Внесение одного вида удобрений – азотных (N_{60}) или калийных удобрений в дозах K_{60} и K_{120} снизило урожайность до 44,7 и 42,9–43,3 ц/га. Парные комбинации азотных и калийных удобрений ($N_{60}K_{120}$ и $N_{60+30}K_{120}$) несколько повысили урожайность зерна ячменя – до 44,1–45,6 ц/га. Однако при пониженной

дозе азотных и повышенной дозе калийных ($N_{45}K_{150}$) увеличение урожайности было менее выраженным – 39,5 ц/га. Внесение фосфорных удобрений перед севом (P_{15}) на фоне $N_{60}K_{120}$ положительно сказалось на урожайности зерна – 48,7 ц/га, в данном варианте наблюдалось наименьшее различие по сравнению с оптимальным вариантом $N_{60+30}P_{60}K_{150} + CuMn$ – 9,8 ц/га (табл. 2).

В 2024 г. урожайность ячменя варьировала от 21,5 до 44,8 ц/га, при этом закономерность, отмеченная в предыдущем году, сохранялась. По сравнению с оптимальным ($N_{60+30}P_{60}K_{150} + CuMn$) вариантом внесение односторонних удобрений (N_{60} , K_{60} , K_{120}) снижало урожайность от 44,8 ц/га до 31,5–35,0 ц/га – на 9,8–13,3 ц/га, или на 21,9–29,7 %. Азотно-калийные удобрения в сочетаниях $N_{60}K_{120}$ и $N_{60+30}K_{120}$ повышали урожайность до 37,1–38,4 ц/га. При минимальной дозе азота и повышенной дозе калия ($N_{45}K_{150}$) урожайность была несколько ниже – 36,3 ц/га (табл. 2).

Таблица 2
Влияние системы удобрения на урожайность ячменя, 2023–2024 гг.

Варианты	Урожайность зерна, ц/га			Снижение урожайности		Окупаемость 1 кг NPK, кг зерна
	2023 г.	2024 г.	среднее	ц/га	%	
1. Контроль без удобрений	34,3	21,5	27,9	–	–	–
2. $N_{60+30}P_{60}K_{150} + CuMn$ (оптимум)	58,5	44,8	51,7	–	100	7,9
3. N_{60}	44,7	35,0	39,9	–11,9	–22,9	19,9
4. K_{60}	43,3	31,5	37,4	–14,3	–27,7	15,8
5. K_{120}	42,9	33,7	38,3	–13,4	–25,9	8,7
6. $N_{60}K_{120}$	45,6	37,1	41,4	–10,3	–20,0	7,5
7. $N_{60+30}K_{120}$	44,1	38,4	41,3	–10,5	–20,2	6,4
8. $N_{45}K_{150}$	39,5	36,3	37,9	–13,8	–26,7	5,1
9. $N_{60}P_{15}K_{120}$	48,7	40,7	44,7	–7,0	–13,5	8,6
HCP 05	4,75	3,53	4,18	–	–	–

В среднем за два года исследований (2023–2024 гг.) урожайность в опыте находилась в пределах от 27,9 ц/га на контроле до 37,4–51,7 ц/га в вариантах с удобрениями. Применение односторонних, несбалансированных удобрений способствовало формированию урожая зерна ячменя на 7,0–16,3 ц/га ниже по сравнению с вариантом, где применялись макро- и микроудобрения в необходимых для роста и развития дозах – 51,7 ц/га. Вариант с припосевным внесением фосфора (P_{15}) на фоне азотных и калийных удобрений $N_{60}K_{120}$ обеспечил наименьшие потери урожая – 7,0 ц/га, или – 13,5 % в сравнении с оптимальным вариантом (51,7 ц/га). При одностороннем внесении азотных и калийных удобрений, а также их парных сочетаний (NK) наблюдалось снижение урожайности зерна к варианту 2 в пределах от 10,5 до 14,3 ц/га, или 20,1–27,7 %.

Таким образом, отсутствие одного или двух видов минеральных удобрений или несбалансированное внесение этих удобрений на хорошо обеспеченных фосфором и калием почвах приводило к снижению урожайности ячменя на 7,0–14,3 ц/га (13,5–27,7 %) по сравнению с оптимальным вариантом $N_{60+30}P_{60}K_{150} + CuMn$. Окупаемость 1 кг удобрений в оптимальном варианте 2, а также в следующем по эффективности варианте 9 с припосевной дозой фосфора P_{15} составляла 7,9–8,6 кг зерна, что, по данным других исследователей, при высокой урожайности покрывает затраты и обеспечивает приемлемую рентабельность – около 13 % [12, 13]. Более высокая окупаемость 1 кг удобрений зерном была получена при использовании одностороннего азотного и калийного удобрения в минимальной дозе N_{60} и K_{60} , что является следствием низкой дозы удобрений, а большой недобор урожайности зерна 11,9 и 14,8 ц/га показывает нецелесообразность их внесения на хорошо обеспеченных калием и фосфором почвах.

Удобрения повлияли и на химический состав зерна ячменя. Анализ химического состава зерна ячменя показал, что на протяжении 2-х лет исследований содержание основных элементов питания, за исключением азота, было достаточно консервативным и мало изменялось в зависимости от вариантов опыта, что соответствует биологическим особенностям изучаемой культуры (табл. 3). Существенно в зерне ячменя изменялось только содержание азота. Если в контролльном варианте без внесения удобрений содержание азота в 2023 г. составляло 1,43 %, то в вариантах с внесением различных доз и соотношений минеральных удобрений оно изменялось от 1,61 до 2,01 %. Наименьшим было содержание азота при внесении калийных удобрений в дозах K_{60-120} – 1,61–1,63 %, внесение азотных и калийных удобрений, а также NPK в различных соотношениях повысило содержание азота до 1,84–2,01 %. Масса 1000 зерен была наименьшей на контроле и при внесении одних калийных удобрений: 43,4 и 46,9–47,2 г., внесение азотных и калийных удобрений (NK) и полного минерального удобрения (NPK) повышало массу 1000 зерен до 48,0–50,4 г. Отмечена тенденция повышения массы 1000 зерен при проведении азотной подкормки в дозе N_{30} в фазу второго узла (стадия 32 по BBCN). Содержание протеина в зерне увеличивалось от 8,9 % (контроль) до 10,1–12,6 %, преимущественно в вариантах с азотными удобрениями NPK (табл. 3).

Содержание элементов питания в зерне ячменя в 2024 г. было на уровне предыдущего года. Содержание азота находилось в пределах от 1,74 до 2,02 %, а содержание фосфора – 0,71–0,83, калия – 0,58–0,67, кальция – 0,11–0,13 и магния – 0,32–0,37 %. Наибольшее варьирование в зависимости от применяемых удобрений наблюдалось по содержанию азота, повторялась закономерность, отмеченная в 2023 г. На контроле содержание азота в зерне ячменя составило 1,74 %, при внесении калия K_{60-120} – 1,78–1,79, азота и калия в парных комбинациях – 1,81–2,02, оптимальная и дефицитная доза NPK – 1,95–2,02 %, при одностороннем внесении азота (моноазотной системе) N_{60} содержание азота было также высоким – 1,97 %. Масса 1000 зерен при внесении удобрений увеличивалась от 42,5 до 45,3–48,8 г. Внесение калийных удобрений минимально повышало массу зерен – 45,3–45,9 г, азотные удобрения и NPK – до 47,3–48,8 г.

Таблица 3

Влияние удобрений на содержание протеина, элементов питания в зерне ячменя и массу 1000 зерен на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (ОАО «Гастелловское» Минского района Минской области, 2023–2024 гг.)

Варианты	Содержание, % на сухое вещество						Масса 1000 зерен, г
	N общ.	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	протеин	
2023 г.							
1. Контроль без удобрений	1,43	0,49	0,36	0,10	0,10	8,9	43,4
2. N ₆₀₊₃₀ P ₆₀ K ₁₅₀ + CuMn (оптимум)	1,90	0,62	0,32	0,11	0,09	11,9	49,2
3. N ₆₀	1,84	0,64	0,35	0,12	0,10	11,5	48,4
4. K ₆₀	1,61	0,59	0,32	0,06	0,09	10,1	47,2
5. K ₁₂₀	1,63	0,46	0,36	0,09	0,08	10,2	46,9
6. N ₆₀ K ₁₂₀	1,84	0,97	0,33	0,14	0,09	11,5	48,9
7. N ₆₀₊₃₀ K ₁₂₀	2,01	0,81	0,33	0,09	0,09	12,6	50,4
8. N ₄₅ K ₁₅₀	1,85	0,63	0,40	0,09	0,09	11,6	48,0
9. N ₆₀ P ₁₅ K ₁₂₀	1,96	0,68	0,32	0,10	0,08	12,3	48,4
HCP ₀₅	0,115	0,071	0,030	0,022	0,021	0,62	1,65
2024 г.							
1. Контроль без удобрений	1,74	0,71	0,58	0,11	0,32	10,9	42,5
2. N ₆₀₊₃₀ P ₆₀ K ₁₅₀ + CuMn (оптимум)	2,02	0,83	0,67	0,13	0,37	12,6	48,2
3. N ₆₀	1,97	0,81	0,65	0,13	0,36	12,3	47,3
4. K ₆₀	1,79	0,73	0,59	0,11	0,33	11,2	45,9
5. K ₁₂₀	1,78	0,73	0,59	0,11	0,33	11,1	45,3
6. N ₆₀ K ₁₂₀	1,81	0,83	0,67	0,13	0,37	11,3	46,2
7. N ₆₀₊₃₀ K ₁₂₀	2,02	0,74	0,60	0,12	0,33	12,6	48,8
8. N ₄₅ K ₁₅₀	1,84	0,80	0,65	0,12	0,36	11,5	46,9
9. N ₆₀ P ₁₅ K ₁₂₀	1,95	0,75	0,61	0,12	0,34	12,2	48,1
HCP ₀₅	0,107	0,044	0,035	0,007	0,020	0,617	1,52

ВЫВОДЫ

На почвах с высокой степенью обеспеченности фосфором и калием оптимальная система удобрения N₆₀₊₃₀P₆₀K₁₅₀ с некорневой обработкой микроэлементами медью и марганцем в хелатной форме обеспечила урожай ячменя 51,7 ц/га. Применение одного вида минеральных удобрений, азотных – в дозе N₆₀, а также калийных – K₆₀ и K₁₂₀ снижало урожайность зерна в сравнении с оптимальным вариантом на 11,9–14,3 ц/га (23–28 %). Несбалансированное внесение азотных

и калийных удобрений без применения фосфорных снижало урожайность зерна примерно в тех же пределах. Припосевное внесение фосфора в дозе P_{15} на фоне $N_{60}K_{120}$ обеспечило достоверное или близкое к достоверному увеличение урожайности зерна на 3,1–3,6 ц/га. При этом наблюдалось наименьшее снижение урожайности (7,0 ц/га, или 13,5 %) в сравнении с оптимальной дозой удобрений – $N_{60+30}P_{60}K_{150} + CuMn$.

Удобрения положительно влияли на химический состав зерна ячменя и массу 1000 зерен. Содержание азота и протеина было выше в вариантах с азотными удобрениями и в варианте с подкормкой азотом и микроэлементами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов, И. А. Эффективность интенсивного применения удобрений и воспроизводство плодородия дерново-подзолистой почвы / И. А. Иванов, П. А. Филиппов / Развитие и внедрение современных технологий и систем ведения сельского хозяйства, обеспечивающих экологическую безопасность окружающей среды: материалы Международной науч.-практ. конференции, посвящ. 100-летию Пермского НИИСХ, 3–5 июля 2013 г. г. : Пермь : в 3 томах. – Т. 1. Агрохимия и земледелие. – Пермь, 2013. – С. 217–225.
2. Лапа, В. В. Эффективность систем применения удобрений в звене севооборота на дерново-подзолистой супесчаной почве / В. В. Лапа, Н. Н. Ивахненко, Л. Ю. Полонская [и др.] // Почвенные исследования и применение удобрений. – 2001. – Вып. 26. – С. 13–24.
3. Вербицкая, О. П. Об изменении плодородия дерново-подзолистых почв на моренном суглинке в длительном стационарном опыте Костромского НИИСХ / О. П. Вербицкая, Т. В. Кондратьева / Развитие и внедрение современных технологий и систем ведения сельского хозяйства, обеспечивающих экологическую безопасность окружающей среды: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию Пермского НИИСХ, 3–5 июля 2013 г. Пермь: в 3-х томах. – Т. 1. Агрохимия и земледелие. – Пермь : ОТ и ДО, 2013. – С. 89–97.
4. Кулаковская, Т. Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений / Т. Н. Кулаковская. – М. : Агропромиздат, 1990. – 219 с.
5. Мезенцева, Е. Г. Минеральные удобрения: современные тенденции в эффективности АПК Республики Беларусь / Е. Г. Мезенцева, О. Г. Кулеш, С. М. Зенькова / Плодородие почв и эффективное применение удобрений: материалы Международной научно-производственной конференции, в 2 ч. / редкол. : В. В. Лапа [и др.]. – Минск : Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2021. – 261 с.
6. Государственный реестр средств защиты растений и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь. – Минск : Промкомплекс, 2023. – 802 с.
7. Организационно-технологические нормативы возделывания зерновых, зернобобовых, крупяных, комовых и технических растений: сб. отраслевых регламентов / Нац. акад. наук Беларусь, Науч. практ. центр Нац. акад. наук Беларусь по земледелию ; под общ. ред. В. Г. Гусакова, Ф. И. Привалова. – Минск : ИВЦ Министерства финансов РБ, 2022. – 531 с.
8. Лапа, В. В. Методические указания по проведению регистрационных испытаний макро-, микроудобрений и регуляторов роста растений в посевах сельскохозяйственных культур / В. В. Лапа, А. А. Григорьев, А. А. Григорьева. – Минск : Агропромиздат, 1990. – 128 с.

- зяйственных культур в Республике Беларусь / В. В. Лапа, М. В. Рак, С. А. Титова // РУП «Институт почвоведения и агрохимии». – Минск, 2008. – 36 с.
9. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – М. : ИД Альянс. 2011. – 352 с.
10. Справочно-информационный портал «Погода и климат»: [сайт. – М., 2006–2025. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 5.03.2025))
11. Гольберг, М. А. Агроклиматические ресурсы Белорусской ССР / М. А. Гольберг, В. И. Мельник ; под общ. ред. М. А. Гольберга. – Минск, 1985. – 114 с.
12. Башков, А. С. Повышение эффективности удобрений на дерново-подзолистых почвах Среднего Предуралья: монография / А. С. Башков. – Ижевск: ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2013. – 328 с.
13. Минеев, В. Г. Удобрение зерновых культур / В. Г. Минеев, М. М. Ивлев, Д. М. Аникст. – М. : Россельхозиздат, 1980. – 160 с.

EFFECT OF BALANCED MINERAL NUTRITION ON BARLEY YIELD AND PAYMENT OF MINERAL FERTILIZERS

V. V. Lapa, V. V. Grakun, S. S. Khmelevsky, G. V. Pirogovskaya, V. I. Soroko

Summary

The results of studies on the effect of balanced mineral nutrition on barley yield when grown on sod-podzolic light loamy soil are presented. It was found that, on average, over two years of research, with the application of optimal doses of NPK, the yield was 51,7 c/ha. The absence or deficiency of any of the nutrients led to a significant decrease in grain yield. The most significant decrease in barley grain yield was observed when applying only potassium fertilizers (14,3 c/ha) and nitrogen-potassium fertilizers in an unbalanced ratio of $N_{45}K_{150}$ (13,8 c/ha).

Поступила 14.05.25