

2. ПЛОДРОДИЕ ПОЧВ И ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ

УДК 633.11:631.445.24

ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ И ПРОДУКТИВНОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ НА ВЫСОКООКУЛЬТУРЕННОЙ ДЕРНОВО- ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЕ

О. Г. Кулеш, Е. Г. Мезенцева, О. В. Симанков

*Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Исследованиями установлено, что урожай сухого вещества сельскохозяйственных культур на 80–90 % создается в результате фотосинтеза, который в первую очередь зависит от размеров ассимиляционной поверхности, высоты и густоты стояния растений и ряда других факторов [1]. Все остальные процессы питания растений, в частности водное и минеральное, эффективны в той степени, в которой они обеспечивают и поддерживают оптимальную деятельность фотосинтетического аппарата.

Высокая продуктивность сельскохозяйственных культур определяется динамически оптимальным соотношением отдельных элементов фотосинтеза. К основным из них относят: размер ассимиляционного аппарата, фотосинтетический потенциал, интенсивность и продуктивность фотосинтеза.

Реализация потенциальной продуктивности яровой пшеницы возможна лишь при оптимальных величинах площади листьев и интенсивности фотосинтеза. Эти показатели находятся в тесной взаимной зависимости и реагируют на изменения условий произрастания, фонов питания и норм высева. Поэтому приемы, позволяющие увеличить нарастание поверхности листьев и продолжение ее продуктивного функционирования, имеют большое значение.

Цель исследований – изучить влияние метеорологических условий и уровня минерального питания на формирование биометрических показателей растений яровой пшеницы, установить зависимость урожайности зерна от показателей фотосинтетической активности посевов на высокоокультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные полевые исследования с яровой пшеницей сорта Сударыня проводились в 2018–2020 гг. на опытном поле РУП «Институт почвоведения и агрохимии» в ОАО «Гастелловское» Минского района. Почва ($A_{\text{пах}}$) характеризовалась следующим уровнем агрохимических показателей: pH 5,9–6,1, содержание гумуса – 2,3–2,6 %, подвижные соединения фосфатов – 630–720 и ка-

лия – 210–280 мг/кг почвы. Предшественник яровой пшеницы – горохо-овсяная смесь на зеленую массу, поукосно – редька масличная.

В опыте предусматривалось применение в основное внесение мочевины, аммонизированного суперфосфата и хлористого калия. Азотные удобрения в подкормку вносили в форме мочевины (М) в твердом виде (вариант 7) в фазы 1-го узла и флаг-листа и в виде раствора при разбавлении водой (вариант 8) в фазы 1-го узла, флаг-листа и колошения. Комплексное водорастворимое удобрение АФК ($N_{16}P_{16}K_{16}$) в виде раствора – в фазы 1-го узла, флаг-листа и колошения. Регулятор роста Экосил и микроудобрения МикроСтим-Медь, Марганец применяли в подкормку в фазы 1-го узла и флаг-листа, МикроСил-Бор – в фазу колошения согласно схеме опыта.

Схема опыта:

1. Без удобрений;
2. $P_{30}K_{90}$ – фон;
3. Фон + N_{60} ;
4. Фон + N_{90} ;
5. Фон + N_{120} ;
6. Фон + N_{150} ;
7. Фон + $N_{90+30+30}$ + МикроСтим-Медь, Марганец (1,0 + 1,0 л/га) + Экосил (0,1 + 0,1 л/га);
8. Фон + N_{90} + ($N_{14(M)}$ + АФК, 4кг/га + МикроСтим-Медь, Марганец (1,0 л/га) + Экосил (0,1 л/га))¹ + ($N_{12(M)}$ + АФК, 3кг/га + МикроСтим-Медь, Марганец (1,0 л/га) + Экосил (0,1 л/га))² + ($N_{9(M)}$ + АФК, 2 кг/га + МикроСил-Бор (1,5 л/га))³.

1 – Водный раствор¹– фаза 1-го узла

2 – Водный раствор²– фаза флагового листа

3 – Водный раствор³– фаза колошения.

Агротехника возделывания яровой пшеницы общепринятая для Республики Беларусь, включающая интегрированную систему защиты растений от сорной растительности, вредителей и болезней.

Опыт заложен в 4-кратном повторении, общая площадь делянки – 24 м².

В течение вегетации растений в фазы 1-го узла, флаг-листа, колошения, молочной спелости и созревания осуществлялся мониторинг за биометрическими показателями: количеством побегов, площадью листьев, накоплением биомассы.

Площадь листьев в среднем на один лист рассчитывали по формуле

$$S = D \cdot Ш \cdot 0,65, \quad (1)$$

где S – площадь листа, см²; D – длина листа, см; Ш – ширина листа в самой широкой части, см; 0,65 – коэффициент, отражающий конфигурацию листа.

Фотосинтетический потенциал (ФП, тыс. м²суток/га) и чистую продуктивность фотосинтеза (ЧПФ, г/м² в сутки) определяли по формулам:

$$ФП = (Л_1 + Л_2) / 2n, \quad (2)$$

где L_1, L_2 – площадь листовой поверхности в начале и конце учетного периода, тыс. м²/га; n – количество суток в межфазном периоде;

$$ЧПФ = (B_1 - B_2) / ФП, \quad (3)$$

где B_1 и B_2 – вес сухой массы в начале и в конце учетного периода, кг/га; ФП – фотосинтетический потенциал, тыс. м²суток/га.

Дисперсионный и корреляционный анализ экспериментальных данных выполнен согласно методике полевого опыта Б. А. Доспехова [2] с использованием соответствующих программ пакета MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метеорологические условия (табл. 1) в годы исследований значительно различались, что позволило оценить формирование параметров продукционного процесса яровой пшеницы при различных условиях. В 2018 г. в период от посева и до наступления фазы флаг-листа яровой пшеницы отмечались повышенные температуры воздуха, сопровождавшиеся значительным недостатком влаги. В дальнейшем условия увлажнения улучшились, температурный режим оставался благоприятным. 2019 г. в начальный период вегетации яровой пшеницы характеризовался благоприятными условиями. В то же время критический период по отношению к влаге у яровой пшеницы (1-й узел – колошение) отличался засушливыми условиями. 2020 г. характеризовался лучшей влагообеспеченностью, чем предыдущие годы, при пониженном температурном фоне в начальный период роста растений яровой пшеницы.

Таблица 1

Гидротермические условия по периодам вегетации яровой пшеницы, 2018–2020 гг.

Показатели	Год	Межфазный период				
		Посев – 1-й узел	1-й узел – флаг-лист	Флаг-лист – колошение	Колошение – молочная спелость	Молочная спелость – созревание
Средние t за период, °С	2018	15,8	17,8	18,3	17,1	21,2
	2019	11,4	18,8	22,8	19,4	16,4
	2020	8,2	16,4	21,0	20,1	17,1
$\Sigma t > 10$ °С (активных)	2018	294,2	380,7	164,4	341,6	359,4
	2019	288,0	273,4	155,6	325,3	460,8
	2020	181,6	334,7	188,7	280,7	478,3
Сумма осадков, мм	2018	19,1	2,0	17,7	192,1	11,0
	2019	51,6	14,8	8,1	36,4	63,0
	2020	53,3	90,7	19,9	66,6	35,4

Регулируемым фактором, определяющим формирование листовой поверхности, является минеральное питание. Измерение площади ассимилирующей поверхности по основным фазам развития яровой пшеницы показало, что применение минеральных удобрений способствовало повышению данного показателя в 1,1–2,0 раза в зависимости от вида, дозы удобрений и фазы развития растений (табл. 2).

Таблица 2

Динамика формирования листовой поверхности растений яровой пшеницы, тыс. м²/га (среднее за 2018–2020 гг.)

Вариант опыта	1-й узел	Флаг-лист	Колошение	Молочная спелость
Без удобрений	9,0	9,9	7,1	5,5
P ₃₀ K ₉₀ – фон	13,4	13,6	9,9	6,2

Вариант опыта	1-й узел	Флаг-лист	Колошение	Молочная спелость
Фон + N ₆₀	16,0	14,4	10,9	6,9
Фон + N ₉₀	18,3	19,3	12,6	8,4
Фон + N ₁₂₀	18,2	18,9	12,9	8,8
Фон + N ₁₅₀	17,7	17,2	12,3	8,8
Фон + N ₉₀₊₃₀₊₃₀ + МЭ + РР*	18,0	19,5	13,1	9,6
Фон + N ₉₀ + вр ¹ + вр ² + вр ³ **	17,3	17,9	12,7	8,7
НСР ₀₅	4,1	2,7	3,1	1,9

* МЭ – МикроСтим-Медь, Марганец (1,0 + 1,0 л/га), РР – Экосил (0,1 + 0,1 л/га).

** вр¹ + вр² + вр³ – водный раствор 1 + водный раствор 2 + водный раствор 3.

Внесение фосфорных и калийных удобрений оказывало существенное влияние на данный показатель в первый период роста растений (до появления флагового листа), в дальнейшем площадь листовой поверхности была незначительно выше, чем в варианте без удобрений.

Более значительное влияние на этот параметр роста пшеницы оказали азотные удобрения. Применение N₆₀ несколько стимулировало растения к росту, но, как видно из табл. 1, к концу вегетации показатель площади листовой поверхности снижался практически до уровня варианта P₃₀K₉₀. Оптимальным оказалось внесение 90 кг/га д. в. азота, что способствовало существенному увеличению площади листовой поверхности до 18,3 тыс. м²/га к фазе первого узла, что на 4,9 тыс. м²/га выше, чем в варианте P₃₀K₉₀. Дальнейшее повышение дозы, как правило, не только не приводило к значительному повышению данного показателя, но и незначительно его снижало. Необходимо отметить, что при дробном внесении 150 кг/га азотных удобрений заметна тенденция увеличения продолжительности функционирования листового аппарата, т. е. периода интенсивного фотосинтеза, к фазе молочной спелости данный показатель в варианте Фон + N₉₀₊₃₀₊₃₀ + МЭ + РР составил 9,6 тыс. м²/га, тогда как в остальных не превышал 8,8 тыс. м²/га.

Необходимо отметить, что в опыте в среднем за три года при внесении удобрений максимальный показатель площади листовой поверхности яровой пшеницы не превышал 19,5 тыс. м²/га, в то время как оптимальная величина, по литературным данным [3], составляет 35–40 тыс. м²/га. Данное обстоятельство может быть обусловлено как погодными условиями в годы исследования, так и сортовыми особенностями культуры.

Получение высоких урожаев связано не только с показателями площади листовой поверхности, но и с оптимальным ходом нарастания площади листьев. Обычно листовая поверхность зерновых культур максимального развития достигает к фазе флагового листа. В нашем опыте значительные отклонения метеоусловий от нормы обусловили специфичность динамики формирования ассимиляционного аппарата, отмечавшейся в основном в начальный период вегетации (1-й узел – флаг-лист; рис. 1). В 2018 г. жаркая засушливая погода в период от посева до первого узла обусловила формирование небольшого количества побегов (504–807 шт./м²) при площади ассимиляционного аппарата 15,8 тыс. м² на 1 га, площадь одного листа в среднем составляла 6,8 см². Ухудшение условий от

первого узла к флаг-листу, когда выпало всего 2 мм осадков, привело не только к редукции побегов в среднем на 17 %, но и снижению средней площади одного листа до 6,3 см², что может свидетельствовать об отмирании наиболее крупных листьев. В итоге площадь листовой поверхности на 1 га к фазе флаг-листа снизилась до 9,8 тыс. м².

Благоприятные условия тепло- и влагообеспеченности в начале вегетации в 2019 г. обусловили формирование большого количества побегов (913–1236 шт./м²) со средней площадью одного листа 8,9 см². Вероятно, площадь листовой поверхности на 1 га, полученная в этом году, была близка к оптимальной для фазы 1-го узла – 21,3 тыс. м². Но засушливые условия на следующем этапе развития растений яровой пшеницы привели к усыханию 56 % боковых побегов, что было главной причиной снижения площади листовой поверхности до 18,0 тыс. м²/га, поскольку средняя площадь одного листа по опыту увеличилась до 9,7 см². От фазы флаг-листа до колошения условия продолжили ухудшаться, что обусловило стремительное снижение площади листовой поверхности до 8,8 тыс. м²/га.

Формирование растений до фазы первого узла в 2020 г. происходило в условиях достаточной влагообеспеченности при низком температурном фоне. Средняя температура воздуха в этот период составила 8,2 °С, сумма активных температур по сравнению с предыдущими годами была ниже приблизительно на 100 °С. Это негативно повлияло в первую очередь на рост листьев, средняя площадь одного листа составила 4,1 см², количество побегов (969–1179 шт./м²) при этом было на уровне 2019 г. В результате в этом году показатель площади листьев в фазу первого узла был самым низким – 11,0 тыс. м²/га. Повышение средней температуры в период от 1-го узла до флаг-листа до 16,4 °С обусловило рост вегетативной массы, средняя площадь одного листа достигла 10,0 см² и, несмотря на редукцию побегов, составившую 42 %, площадь листовой поверхности посевов пшеницы увеличилась практически в 2 раза до 21,3 тыс. м². В дальнейшем достаточное количество влаги и тепла обусловило закономерное постепенное снижение площади ассимиляционной поверхности.

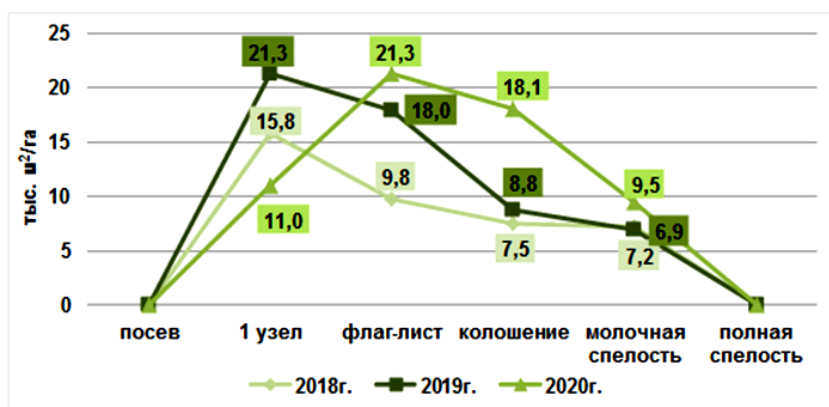


Рис. 1. Динамика формирования листовой поверхности растений яровой пшеницы по годам исследования

Формирование урожая зависит не только от величины площади листьев, но и от времени ее функционирования. Фотосинтетический потенциал (ФП) объединяет эти показатели. Главными факторами, определяющими как площадь листьев, так и ФП посевов, являются влагообеспеченность и минеральное питание растений. Влагообеспеченность обусловила изменение фотосинтетического показателя по годам исследования, влияние минерального питания в разные годы исследований в целом подчинялось тем же закономерностям (табл. 3).

Таблица 3

Влияние систем удобрения на динамику фотосинтетического потенциала яровой пшеницы, тыс. м² сутки/га

Вариант опыта	1-й узел	Флаг-лист	Колошение	Молочная спелость	Полная спелость	За период вегетации			
	Среднее за 2018–2020 гг.					2018–2020 гг.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Без удобрений	176	178	68	114	60	596	646	523	616
P ₃₀ K ₉₀ – фон	262	239	96	144	68	809	734	692	1004
Фон + N ₆₀	324	283	111	165	82	965	865	1017	1012
Фон + N ₉₀	386	348	134	189	93	1150	1007	1264	1179
Фон + N ₁₂₀	376	335	138	212	100	1161	1056	1120	1308
Фон + N ₁₅₀	319	299	120	183	101	1022	868	939	1262
Фон + N ₉₀₊₃₀₊₃₀ + МЭ + РР	360	339	133	204	114	1150	1025	1154	1271
Фон + N ₉₀ + вр ¹ + вр ² + вр ³	292	310	137	197	100	1036	989	1005	1115
НСР ₀₅	80	46	17	34	22	155	186	233	204

В среднем за три года наименьшие значения ФП отмечались в варианте без удобрений во все фазы развития растений яровой пшеницы (60–178 тыс. м² суток/га). Фосфорные и калийные удобрения оказывали значительное влияние на увеличение данного показателя в 1,4–1,6 раза до фазы колошения, далее влияние было несущественным. Наибольшее влияние на ФП, как и на площадь листовой поверхности, оказали азотные удобрения. Оптимальным при этом было применение N₉₀, при котором ФП в разные фазы составил в среднем за три года 93–386 тыс. м² суток/га. Увеличение дозы удобрений до N₁₂₀ не способствовало существенному повышению данного показателя, а при внесении N₁₅₀ отмечалась тенденция его снижения.

Наибольших величин фотосинтетический потенциал достигал в период до появления первого узла (176–386 тыс. м² суток/га) и от первого узла до флаг-листа (178–348 тыс. м² суток/га). Невысокие значения показателя от флаг-листа до колошения (68–138 тыс. м² суток/га) обусловлены в первую очередь небольшой продолжительностью функционирования листовой поверхности, поскольку период длился 7–10 дней в зависимости от года. В следующий период (от колошения до молочной спелости) величина листовой поверхности уменьшалась, но за счет увеличения времени ее функционирования (14–31 день) ФП был выше – 114–212 тыс. м² суток/га. От молочной к полной спелости яровой пшеницы

фотосинтетический потенциал листовой поверхности самый низкий – 60–114 тыс. м² суток/га, что обусловлено усыханием листьев.

По годам исследования наибольший фотосинтетический потенциал посева яровой пшеницы отмечен в 2020 г. – 616–1308 тыс. м² суток/га, наименьший в 2018 г. – 648–1056 тыс. м² суток/га.

Одним из главных показателей фотосинтетической деятельности растений считается также нарастание сухой массы. В то время как площадь листовой поверхности и фотосинтетический потенциал наибольших величин достигают в начальные периоды роста растений яровой пшеницы – до фазы флагового листа, накопление сухой массы повышается от 8,9–13,9 ц/га в фазу первого узла до 78,9–101,4 ц/га в фазу полной спелости (табл. 4). Но при этом наибольшие темпы нарастания сухого вещества наблюдаются в период от первого узла до появления флагового листа, когда сухая масса растений яровой пшеницы увеличивалась в среднем за три года в 3,3 раза. В дальнейшем повышение данного показателя от фазы к фазе не превышало 65 % (1,7 раза).

Таблица 4

Динамика накопления сухой массы растений яровой пшеницы, ц/га

Вариант опыта	1-й узел	Флаг-лист	Колошение	Мо-лочная спелость	Полная спелость	Полная спелость		
	Среднее за 2018–2020 гг.					2018 г.	2019 г.	2020 г.
Без удобрений	8,9	29,9	40,6	67,4	78,9	59,3	79,2	98,2
P ₃₀ K ₉₀ – фон	9,7	35,4	45,4	71,5	81,7	60,7	79,9	104,4
Фон + N ₆₀	12,7	38,9	51,2	84,8	91,6	66,9	100,1	107,9
Фон + N ₉₀	13,4	41,6	50,3	90,8	98,3	77,5	104,6	112,7
Фон + N ₁₂₀	13,9	44,0	59,5	95,7	97,2	76,5	105,6	109,5
Фон + N ₁₅₀	13,0	46,0	52,6	88,8	94,7	79,7	103,5	100,9
Фон + N ₉₀₊₃₀₊₃₀ + МЭ + РР	13,2	45,7	55,4	89,5	99,6	78,5	102,6	117,8
Фон + N ₉₀ + вр ¹ + вр ² + вр ³	13,0	44,4	56,6	92,8	101,4	80,5	110,5	113,2
НСР ₀₅	1,4	5,0	8,8	11,1	11,3	13,4	14,2	8,9

Наиболее существенное влияние на формирование сухой массы оказали азотные удобрения, которые в фазу первого узла повышали данный показатель в среднем на 36 % по отношению к фосфорно-калийному фону. В последующие фазы повышение накопления сухой массы от азотных удобрений составляло 14–26 %. В целом влияние различных изучаемых доз азотных удобрений на нарастание сухой массы растений яровой пшеницы различалось несущественно.

В зависимости от гидротермических условий вегетационного периода к фазе полной спелости в разные годы было сформировано разное количество сухой массы. Наименьший показатель отмечен в 2018 г. – 59,3–80,5 ц/га, наибольший в 2020 г. – 98,2–117,8 ц/га.

Чистая продуктивность фотосинтеза (ЧПФ) характеризует интенсивность фотосинтеза посева и представляет собой количество сухой массы растений в граммах, которое синтезирует 1 м² листовой поверхности за сутки.

В нашем опыте показатели ЧПФ по вариантам опыта в 2019 г. изменялись в пределах от 8,5 до 14,8 г/м² в сутки, в 2020 г. – от 8,0 до 16,0 г/м² в сутки (табл. 5).

Засушливые условия в 2018 г. обусловили чистую продуктивность фотосинтеза за вегетацию на уровне 7,0–11,0 г/м² в сутки. Тем не менее это хороший результат, поскольку считается, что в среднем за вегетацию у таких культур, как пшеница, ячмень, ЧПФ составляет 5–7 г/м² в сутки [4].

Наибольших величин ЧПФ как за вегетацию по годам (11,0–16,0 г/м² в сутки), так и по фазам роста и развития растений яровой пшеницы в среднем за три года (5,1–25,5 г/м² в сутки) достигала в варианте без внесения удобрений, это может быть обусловлено тем, что в вариантах с внесением удобрений площадь листьев достигает больших величин и взаимное затенение листьев ведет к снижению интенсивности и чистой продуктивности фотосинтеза. В исследованиях подчеркивается физиологическая основа отрицательной связи между площадью листьев и ЧПФ [5]. Наибольшие показатели чистой суточной продуктивности в варианте без удобрений и при внесении P₃₀K₉₀ были достигнуты в межфазный период от молочной до полной спелости, накопление сухого вещества при этом составило 19,0–25,5 г на 1 м² площади листьев в сутки. В вариантах с внесением азотных удобрений наибольший суточный прирост сухого вещества наблюдался в период от колошения до молочной спелости – 16,7–21,4 г/м² или 167–214 кг/га.

Для получения высокой урожайности зерновых культур важно сформировать оптимальную ее структуру, основными элементами которой являются количество продуктивных стеблей, число зерен в колосе и масса 1000 зерен.

Таблица 5

Чистая продуктивность фотосинтеза яровой пшеницы, г/м² в сутки

Вариант опыта	Межфазный период, среднее за 2018–2020гг.					За период вегетации			
	1	2	3	4	5	2018– 2020 гг.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Без удобрений	5,1	11,8	15,8	23,5	25,5	13,9	11,0	14,8	16,0
P ₃₀ K ₉₀ – фон	3,5	10,4	10,4	18,1	19,0	10,2	7,7	11,8	11,1
Фон + N ₆₀	3,9	9,3	11,1	20,4	4,6	9,1	7,5	10,0	9,9
Фон + N ₉₀	3,5	8,1	6,5	21,4	10,0	8,6	7,7	8,5	9,6
Фон + N ₁₂₀	3,7	9,0	11,2	17,1	5,5	8,8	8,2	9,8	8,5
Фон + N ₁₅₀	4,1	11,0	5,5	19,8	3,9	9,0	7,9	11,0	8,0
Фон + N ₉₀₊₃₀₊₃₀ + МЭ + РР	3,7	9,6	7,3	16,7	7,8	8,5	7,0	9,1	9,3
Фон + N ₉₀ + вр ¹ + вр ² + вр ³	4,6	10,7	9,5	18,5	4,5	9,3	7,4	10,4	10,1
НСП ₀₅	–	1,7	–	–	–	1,9	–	–	1,7

Примечание. 1 – посев–1-й узел; 2 – 1-й узел–флаг-лист; 3 – флаг-лист–колошение; 4 – колошение–молочная спелость; 5 – молочная спелость–полная спелость

Наименьшее количество продуктивных побегов в опыте к уборке отмечалось в варианте без удобрений и в зависимости от года составляло 377–473 шт./м² (табл. 6). Внесение азотных удобрений достоверно повышало данный показатель. В 2018 г. наиболее эффективным был вариант с внесением перед посевом N₉₀P₃₀K₉₀ и подкормками в виде водных растворов, где количество продуктивных побегов составило 483 шт./м². В 2019 г. только в вариантах Фон + N₉₀₊₃₀₊₃₀ + МЭ + РР и Фон + N₉₀ + вр¹ + вр² + вр³ количество продуктивных

колосьев (500–503 шт./м²) было значительно выше, чем в фоновом варианте. В 2020 г. достаточным было внесение N₉₀ на фоне P₃₀K₉₀ (672 продуктивных колоса), дальнейшее повышение дозы азота было неэффективным.

Таблица 6

Влияние систем удобрения на формирование компонентов структуры урожая яровой пшеницы

Вариант опыта	Фазы											
	Продуктивные колосья, шт./м ²			Число зерен в колосе, шт.			Масса 1000 зерен, г			Масса зерна 1 колоса, г		
	2018	2019	2020	2018	2019	2020	2018	2019	2020	2018	2019	2020
Без удобрений	377	413	473	21,1	23,6	28,2	44,9	41,9	46,2	0,95	0,99	1,30
P ₃₀ K ₉₀ – фон	412	441	569	19,3	25,0	24,9	45,0	43,0	44,7	0,87	1,05	1,11
Фон + N ₆₀	447	447	581	20,0	28,4	26,4	46,4	43,3	46,1	0,93	1,23	1,23
Фон + N ₉₀	427	451	672	22,9	29,8	27,1	45,4	42,9	44,6	1,04	1,28	1,22
Фон + N ₁₂₀	465	459	567	20,8	29,1	27,8	46,1	43,6	45,4	0,96	1,27	1,26
Фон + N ₁₅₀	455	437	547	20,5	30,2	28,0	46,2	43,0	46,9	0,95	1,30	1,24
Фон + N ₉₀₊₃₀₊₃₀ + МЭ + РР	425	503	633	21,6	32,2	29,8	46,7	42,2	46,1	1,04	1,38	1,29
Фон + N ₉₀ + вр ¹ + вр ² + вр ³	483	500	562	20,8	31,8	27,8	46,2	43,9	47,6	0,96	1,34	1,44
НCP ₀₅	22	57	95	1,1	1,1	–	1,9	1,6	–	0,06	0,05	–

Корреляционный анализ данных, полученных за три года, свидетельствует о значительной зависимости урожайности яровой пшеницы от плотности продуктивного стеблестоя ($R^2 = 0,62$). При этом теснота связи урожайности с данным показателем в разные годы исследования была неодинаковой. Наиболее тесная связь ($R^2 = 0,70$) отмечалась в 2018 г., когда наблюдалась и наибольшая сохранность побегов к уборке по отношению к фазе 1-го узла – 65 %. В 2019 г., при самой низкой сохранности продуктивных стеблей 44 %, коэффициент детерминации, характеризующий связь между исследуемыми величинами, составил 0,49. В 2020 г. при сохранности продуктивных стеблей 53 % R^2 был равен 0,64.

Значительный дефицит осадков и влаги в почве и высокие температуры в 2018 г. в период роста колосового стержня и формирования репродуктивных органов (колосков, цветков в колосках, пыльцы, завязи и зерна) привел к образованию сравнительно низкого количества зерен в колосе – 19,3–22,9 шт. и, как следствие, масса зерна одного колоса также была низкой – 0,87–1,04 г. Расчет коэффициента детерминации для данных величин (0,21 и 0,37 соответственно) свидетельствует об отсутствии существенной их связи с урожайностью. При этом улучшение влагообеспеченности от молочной спелости к созреванию, когда происходил налив зерна, обусловило его получение с высокой массой 1000 зерен (44,9–46,7 г), $R^2 = 0,82$, что свидетельствует о высокой сопряженности этого показателя с урожайностью, тогда как в другие годы исследования и в среднем за три года такая связь отсутствовала.

В 2019 г. прохождение фаз колошения и молочной спелости при благоприятных гидротермических условиях обеспечило сохранение количества и налив

зерновок, число зерен в колосе к уборке сохранилось на уровне 23,6–32,2 шт., что обеспечило высокую для яровой пшеницы массу зерна 1-го колоса (0,99–1,38 г). Необходимо отметить, что именно с этими показателями наблюдалась тесная связь урожайности в этом году – $R^2 = 0,85$ и $0,89$ соответственно. При этом высокая озерненность колоса вполне объясняет полученную в этом году сравнительно невысокую массу 1000 зерен – 41,9–43,9 г.

Наиболее благоприятные погодные условия, сложившиеся в 2020 г., позволили получить массу зерна 1-го колоса на уровне 1,11–1,44 г. Высокий показатель был получен в первую очередь за счет крупного зерна (масса 1000 зерен составила 44,6–47,6 г), а также большого числа зерен в одном колосе (24,9–29,8 г). Данные показатели мало изменялись по вариантам опыта, поэтому повышение урожайности в удобряемых вариантах объясняется в основном за счет количества побегов, что было отмечено выше.

Таким образом, в различных погодных условиях формирование урожайности происходило за счет различных компонентов структуры урожая, при этом наиболее сопряженными были те, время формирования которых совпадало с благоприятными условиями влаго- и теплообеспеченности.

Особенности как фотосинтетической активности, так и формирования компонентов структуры урожая, отмечавшиеся по годам исследования, отразились на конечном результате – урожайности зерна яровой пшеницы.

Наименьшая фотосинтетическая активность, наблюдавшаяся в 2018 г., обусловила и наименьшую продуктивность культуры – 33,8–46,5 ц/га зерна (табл. 7). Наилучшие показатели, отмечавшиеся в 2020 г., позволили получить 55,4–65,9 ц/га зерна.

Таблица 7

Урожайность яровой пшеницы в зависимости от систем удобрения, ц/га

Вариант опыта	2018 г.	2019 г.	2020 г.	Среднее
Без удобрений	33,8	43,3	55,4	44,2
$P_{30}K_{90}$ – фон	36,0	43,7	58,1	45,9
Фон + N_{60}	41,4	55,1	60,6	52,4
Фон + N_{90}	44,2	57,7	60,9	54,3
Фон + N_{120}	44,7	58,3	60,0	54,3
Фон + N_{150}	43,2	54,9	60,2	52,8
Фон + $N_{90+30+30}$ + МЭ + РР	44,4	57,2	65,9	55,8
Фон + N_{90} + $вр^1$ + $вр^2$ + $вр^3$	46,5	60,0	65,3	57,3
$НСП_{05}$	1,6	1,7	2,5	1,1

Максимальная разница в урожайности между годами исследования достигала 22,1 ц/га, в то же время наибольшие прибавки от удобрений не превышали 16,7 ц/га и были получены в 2019 г. Рост продуктивности в этом году достигнут за счет азотных удобрений, при полном отсутствии отдачи от фосфорных и калийных.

В 2018 и 2020 г. наблюдались аналогичные тенденции в изменении урожайности по вариантам опыта. Засушливые условия в 2018 г. и холодные в начале вегетации 2020 г. обусловили эффективность внесения фосфорных и калийных удобрений. Достоверное повышение урожайности от данного приема составило

2,2–2,7 ц/га. Прибавки от азотных удобрений составили 5,4–8,7 ц/га в 2018 г. и 1,9–2,8 ц/га в 2020 г. Дополнительный сбор зерна от комплексного применения удобрений с микроудобрениями и Экосилом относительно фонового варианта в 2018 г. не превышал 2,3 ц/га, в 2020 г. – 5,0 ц/га.

Как видно, наименьшие прибавки от удобрений получены в 2020 г., в наиболее благоприятных для формирования высокой продуктивности яровой пшеницы условиях.

Наиболее эффективным в опыте было припосевное внесение $N_{90}P_{30}K_{90}$ и применение водных растворов удобрений в три подкормки, при этом в среднем за три года было получено 57,3 ц/га зерна. При применении удобрений в твердом виде наибольшая урожайность – 55,8 ц/га – была получена при дробном применении 150 кг/га азотных удобрений совместно с микроэлементами и Экосилом на фоне $P_{30}K_{90}$.

Методом корреляционного анализа выявлены количественные взаимосвязи между показателями фотосинтетической деятельности в основные фазы роста и развития растений яровой пшеницы с одной стороны и величиной урожая с другой. Установлены наиболее информативные и надежные показатели с $R^2 \geq 0,6$ (табл. 8).

Таблица 8

Математические модели зависимости урожайности яровой пшеницы от показателей фотосинтетической деятельности растений в основные фазы роста и развития

Показатель	Фаза	Уравнение	R^2
Площадь листовой поверхности	Флаг-лист	$y = 1,332x + 30,15$	0,84
	Колошение	$y = 1,3875x + 36,236$	0,64
Количество побегов	1-й узел	$y = 0,0403x + 14,248$	0,80
Сухая биомасса	Колошение	$y = 0,4779x + 27,608$	0,71
	Молочная спелость	$y = 0,4716x + 12,002$	0,89
Фотосинтетический потенциал	1-й узел	$y = 0,0967x + 31,897$	0,68
	Флаг-лист	$y = 0,095x + 24,297$	0,59
	Колошение	$y = 0,1434x + 34,77$	0,59
	Полная спелость	$y = 0,1959x + 34,742$	0,60
	Период вегетации	$y = 0,0329x + 22,4$	0,69
Чистая продуктивность фотосинтеза	Флаг-лист	$y = -3,5561x + 88,626$	0,68

Полученные данные свидетельствуют о том, что оценка состояния посевов в фазы 1-й узел–колошение дает возможность прогнозирования продуктивности яровой пшеницы. Наибольшее количество сопряженных показателей при этом выявлено в фазу флагового листа. Необходимо отметить, что в эту фазу отмечается тесная связь площади листовой поверхности с числом зерен в колосе и массой зерна одного колоса (рис. 2).

С учетом результатов корреляционного анализа, на основании данных, полученных в полевом опыте, определены оптимальные параметры фотосинтетической активности, необходимые для получения продуктивности яровой пшеницы на уровне 60–65 ц/га зерна (табл. 9). Неотъемлемым условием для достижения

этого, наряду с погодными условиями, близкими к оптимальным, является применение минеральных удобрений – дробное применение $N_{120-150}$ (в твердом виде или в виде водных растворов) на фоне $P_{30}K_{90}$ совместно с микроудобрениями и Экосилом.

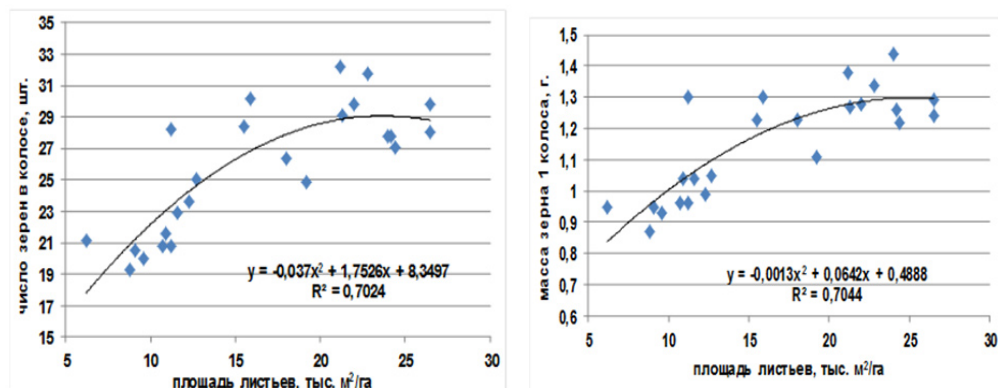


Рис. 2. Графики криволинейной связи между площадью листьев в фазу флагового листа; числом зерен в колосе и массой зерна одного колоса

Таблица 9

Оптимальные параметры роста и развития растений яровой пшеницы на ранних стадиях, позволяющие получить урожайность культуры на уровне 60–65 ц/га

Фаза развития	Компонент фотосинтетической активности
1-й узел	ФП – 250–350 тыс. м ² сутки/га, побеги – 1000–1100 шт./м ²
Флаг-лист	Площадь листовой поверхности – 20–25 тыс. м ² /га, ФП – 300–400 тыс. м ² сутки/га, ЧПФ – 8,0–10,0 г/м ² в сутки
Колошение	Площадь листовой поверхности – 10–20 тыс. м ² /га, ФП – 110–210 тыс. м ² сутки/га, сухая биомасса – 55–85 ц/га
Молочная спелость	Сухая биомасса – 105–120 ц/га

ВЫВОДЫ

В результате исследований, проведенных на высококультуренной дерново-подзолистой суглинистой почве, установлено существенное влияние азотных удобрений на улучшение фотосинтетической деятельности растений яровой пшеницы. Оптимальным при этом было применение N_{90} . При дробном внесении 150 кг/га азотных удобрений отмечалась тенденция увеличения продолжительности функционирования листового аппарата.

В различных погодных условиях формирование урожайности происходило за счет различных компонентов структуры урожая, при этом наиболее сопряженными были те, время формирования которых совпадало с благоприятными условиями влаго- и теплообеспеченности.

Для получения стабильно высоких урожаев яровой пшеницы на уровне 60–65 ц/га необходимо формирование в фазу флага-листа площади листовой повер-

хности на уровне 20–25 тыс. м²/га, ФП – 300–400 тыс. м² сутки/га, ЧПФ – 8,0–10,0 г/м² в сутки, что достигается внесением N_{120–150} дробно (в твердом виде или в виде водных растворов) на фоне P₃₀K₉₀ совместно с микроудобрениями и Экосилом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ничипорович, А. А.* Фотосинтетическая деятельность растений и пути повышения их продуктивности / А. А. Ничипорович // Теоретические основы фотосинтетической продуктивности. – М.: Наука, 1972. – С. 511–527.
2. *Доспехов, Б. А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – 5-е изд. доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
3. *Ничипорович, А. А.* Фотосинтез и вопросы продуктивности растений / А. А. Ничипорович. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 158 с.
4. Показатели фотосинтетической деятельности посевов [Электронный ресурс] // Студенческие реферативные статьи и материалы. – Режим доступа: https://studref.com/309502/agropromyshlennost/pokazateli_fotosinteticheskoy_deyatelnosti_posevov. – Дата доступа: 10.11.2020.
5. *Быков, О. Д.* Экологическая и видовая дифференциация пшеницы по уровню фотосинтетической активности / О. Д. Быков, М. И. Зеленский // Научные труды по прикл. ботан., генетике и сел.. – Л., 1987. – Т.100. – С. 196–203.

PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY AND PRODUCTIVITY OF SPRING WHEAT CROPS ON HIGHLY CULTIVATED SOD-PODZOLIC LIGHT LOAMY SOIL

O. G. Kulesh, E. G. Mezentseva, O. V. Simankov

Summary

The data on changes in the photosynthetic activity of spring wheat plants under various fertilization systems are presented. A close relationship has been established between the crop yield and the indicators of photosynthetic activity. The optimal parameters of these indicators at the early stages of development of spring wheat plants have been determined, which make it possible to obtain a crop yield at the level of 60–65 c/ha.

Поступила 20.11.20