

ПИГМЕНТЫ ХЛОРОФИЛЛА И УРОЖАЙНОСТЬ ОЗИМОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВОДНЫХ РЕЖИМАХ

И. А. Лобунская¹, агроном лаборатории клеточной селекции, lobunskaya95@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-1537-8498;

В. Л. Газе¹, младший научный сотрудник лаборатории клеточной селекции, l.fiziologii@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-4618-6125;

Е. Ю. Черпакова¹, агроном лаборатории клеточной селекции, elena123089@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6268-7915;

Н. В. Яновская¹, агроном лаборатории клеточной селекции, ORCID ID: 0000-0001-6198-6270;

С. В. Подгорный¹, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции и семеноводства озимой мягкой пшеницы интенсивного типа, ORCID ID: 0000-0002-8438-1327;

Г. М. Зеленская², доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры растениеводства и садоводства, zela_06@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1537-9207

¹ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», 347740, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3; e-mail: vniizk30@mail.ru;

²ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», 346493, пос. Персиановский, ул. Кривошлыкова; e-mail: agrofak-dgau@yandex.ru

Содержание хлорофилла в флаговом листе является важным признаком засухоустойчивости пшеницы. Понимание регуляторного механизма содержания хлорофилла может ускорить селекцию на устойчивость к засухе. В статье представлены результаты анализа по состоянию пигментного комплекса флаговых листьев образцов озимой мягкой пшеницы и их влияние на урожайность в различных условиях выращивания. Опыты были проведены в 2021–2023 гг. в лаборатории клеточной селекции. Изучалось 11 образцов озимой пшеницы селекции ФГБНУ «АНЦ «Донской». Цель работы: выявить возможность использования показателей пигментов фотосинтетического аппарата в качестве признаков, связанных с засухоустойчивостью и высокой урожайностью. Исследования реакции пигментного комплекса растений озимой пшеницы осуществляли в фазы цветения и молочной спелости зерна. Количественное содержание пигмента хлорофилла определяли методом И. Г. Шматько (1976). Испытание сортов на засухоустойчивость на вегетационной площадке – по методу В. В. Маймистова (1988). Проанализировав данные по соотношению содержания хлорофиллов ($a+b$, a/b) и урожайности в условиях засухи по сравнению с оптимальными условиями, выявлены сорта Дончак (98,4, 84,0 и 81,4 %), Разгуляй (83,3, 80,8 и 70,9 %), Флагман (87,9, 76,2 и 82,7 %) и линии 597/18 (98,5, 87,6 и 75,2 %). Выделенные образцы характеризуются высокой сохранностью суммарного пигмента в обе фазы с незначительным снижением урожайности. Линии 1762/17 (43,3 и 79,2 %), 2060/17 (71,1 и 79,2 %), 597/18 (76,1 и 75,2 %) и 1724/18 (75,0 и 79,7 %), сочетающие в себе минимальное снижение урожайности и соотношения хлорофилла a/b , обладают высокой адаптивной способностью в условиях засухи.

Ключевые слова: озимая мягкая пшеница, сорт, фотосинтетические пигменты, хлорофилл, засухоустойчивость, урожайность.

Для цитирования: Лобунская И. А., Газе В. Л., Черпакова Е. Ю., Яновская Н. В., Подгорный С. В., Зеленская Г. М. Пигменты хлорофилла и урожайность озимой мягкой пшеницы при различных водных режимах // Зерновое хозяйство России. Т. 16. № 4. С. 41–49. DOI: 10.31367/2079-8725-2024-93-4-41-49.



CHLOROPHYLL PIGMENTS AND WINTER COMMON WHEAT PRODUCTIVITY UNDER DIFFERENT WATER REGIMES

I. A. Lobunskaya¹, agronomist of the laboratory for cell breeding, lobunskaya95@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-1537-8498;

V. L. Gaze¹, junior researcher of the laboratory for cell breeding, l.fiziologii@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-4618-6125;

E. Yu. Cherpakova¹, agronomist of the laboratory for cell breeding, elena123089@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6268-7915;

N. V. Yanovskaya¹, agronomist of the laboratory for cell breeding, ORCID ID: 0000-0001-6198-6270;

S. V. Podgorny¹, Candidate of Agricultural Sciences, leading researcher of the laboratory for breeding and seed production of winter common wheat of intensive type, ORCID ID: 0000-0002-8438-1327;

G. M. Zelenskaya², Doctor of Agricultural Sciences, professor of the department of plant production and horticulture, zela_06@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1537-9207

¹FSBSI Agricultural Research Center “Donskoy”, 347740, Rostov region, Zernograd, Nauchny Gorodok, 3; e-mail: vniizk30@mail.ru;

²FSBEI HE “Donskoy State Agricultural University”, 346493, Rostov region, Oktyabrsky district, v. Persyanovsky, Krivoshlykov Str., 24; e-mail: agrofak-dgau@yandex.ru

Chlorophyll in a flag leaf is an important indicator of drought resistance of wheat. Understanding the regulatory mechanism of chlorophyll content may accelerate breeding for drought tolerance. The current paper has presented the analysis results of the state of the pigment complex of flag leaves of winter common wheat samples and their effect on productivity under various growing conditions. The trials were carried out in the laboratory for cell breeding in 2021–2023. There were studied 11 winter wheat samples, developed in the FSBSI “ARC “Donskoy”. The purpose of the work was to identify the possibility of using indicators of photosynthetic pigments as traits responsible for drought resistance and high productivity. The study of the reaction of the pigment complex of winter wheat plants was carried out in the flowering phases and milk-ripe stages of grain. The quantitative content of chlorophyll pigment was determined by the I. G. Shmatko method (1976). Varieties' testing for drought resistance on a growing plot was conducted according to the V. V. Maimistov method (1988). Having analyzed the ratio of chlorophyll content ($a+b$, a/b) and productivity under drought conditions in comparison with optimal conditions, there have been identified the varieties ‘Donchak’ (98.4, 84.0 and 81.4 %), ‘Razgulay’ (83.3, 80.8 and 70.9 %), ‘Flagman’ (87.9, 76.2 and 82.7 %) and the line ‘597/18’ (98.5, 87.6 and 75.2 %). The identified samples were characterized by high preservation of the total pigment in both phases with a slight productivity decrease. The lines ‘1762/17’ (43.3 and 79.2 %), ‘2060/17’ (71.1 and 79.2 %), ‘597/18’ (76.1 and 75.2 %) and ‘1724/18’ (75.0 and 79.7 %), which combined a minimal productivity and chlorophyll a/b ratio decrease, had a high adaptability under drought conditions.

Keywords: winter common wheat, variety, photosynthetic pigments, chlorophyll, drought resistance, productivity.

Введение. Фотосинтез является главным источником химической энергии, используемой в метаболических процессах развития растений. Около 50 % урожайности зерна обеспечивает фотосинтетическая активность во флаговых листьях. Стресс от засухи на стадии налива зерна обычное явление для зерновых культур (Амунова и Лисицын, 2019; Yang et al., 2022). Это приводит к ускоренному разрушению хлорофилла в фотосинтетических органах, таких как листья, снижению скорости и эффективности фотосинтеза. Хлорофилл является ключевым элементом для фотосинтеза, который осуществляет поглощение квантов видимой части солнечного спектра и преобразует световую энергию в энергию химической связи (Голева и др., 2016; Газе и др., 2021; Gu et al., 2017).

Функциональные свойства хлорофиллов различны, пигмент хлорофилла a содержится в реакционных центрах фотосистем, и свето-собирающем комплексе, а пигмент хлорофилла b находится в основном в светособирающем комплексе. Величина соотношения хлорофиллов a/b изменяется в зависимости от сорта и условий выращивания растений и в большинстве случаев при оптимальных условиях составляет 4:1 (Калинина и Лящева, 2018; Синеговская и др., 2022). Низкие значения соотношения хлорофилла a/b свидетельствуют об увеличении содержания хлорофилла b , который оказывает экранирующее действие на фотосинтетически активный хлорофилл a , поэтому высокая доля хлорофилла b может характеризовать адаптивные возможности растений. Хлорофилл b увеличивается в концентрации при выращивании растений в условиях абиотического стресса, в этом случае снижение значений отношения пигментов a/b будет свидетельствовать о повышении устойчивости растений к неблагоприятным условиям внешней среды (Тютерева и др., 2017). Мнения среди исследователей относительно оптимального количества фотосинтетических пигментов в листьях расходятся. Одни ученые считают, что низкая концентрация зеленого пигмента в листьях приводит к снижению светопоглощения и не допускает разрушение фотосинтетического аппарата избытком поглощенной энергии и поэтому может обе-

спечивать его более продуктивную работу (Gu et al., 2017). Другие полагают, что растения с высоким содержанием хлорофилла поглощают больше энергии и, как следствие этого, фотосинтез у них более эффективный (Zhao et al., 2020). Поэтому обладая информацией о количественном содержании и продуктивности их работы, можно дать оценку потенциальной фотохимической активности листьев и прогнозировать урожайность (Лиховидова и др., 2020; Шестакова и др., 2020). Генотипы с высоким содержанием хлорофилла используются в качестве доноров признаков интенсивного нарастания биомассы в результате их роста и развития, а также эффективности фотосинтеза (Гузенко и др., 2024). Исследования позволяют сделать выводы о том, какие пигменты хлорофилла вызывают рост продуктивности, высокую урожайность и могут служить основой для создания моделей новых сортов. Цель работы: выявить возможность использования показателей пигментов фотосинтетического аппарата в качестве признаков, связанных с засухоустойчивостью и высокой урожайностью.

Материалы и методы исследований.

Исследовательская работа была проведена в 2021–2023 гг. в лаборатории клеточной селекции ФГБНУ «АНЦ «Донской». Материалом исследования служили 11 образцов озимой мягкой пшеницы местной селекции. В качестве стандарта использовали сорт Ермак. Засухоустойчивость образцов озимой мягкой пшеницы определяли по состоянию пигментного комплекса флаговых листьев в фенологические фазы – цветение и молочная спелость зерна. Для определения количественного содержания пигментов фотосинтетического аппарата (хлорофиллов a , b , $a+b$) по методу И. Г. Шматько и др. (1976) использовали среднюю часть пластинок верхних сформировавшихся листьев главного стебля растения массой 0,5 г, в трехкратном повторении. Оптическую плотность растворов определяли на спектрофотометре Implen 80, длина волны хлорофилл a – 665, b – 649, $a+b$ – 654. Концентрацию пигментов рассчитывали по формуле в зависимости от используемого растворителя – 96 %-й этанол (Wintermans, De Mots, 1965):

$$\begin{aligned} \text{Схл. } a \text{ (мг/л)} &= 13,7 \times D 665 - 5,76 \times D 649; \\ \text{Схл. } b \text{ (мг/л)} &= 25,8 \times D 649 - 7,60 \times D 665; \\ \text{Схл. } a+b \text{ (мг/л)} &= 25,1 \times D 654. \end{aligned}$$

Оценка засухоустойчивости вегетирующих растений была проведена в условиях моделированной засухи (различная степень влагообеспеченности), метод В. В. Маймистова и др. (1988) (рис. 1).

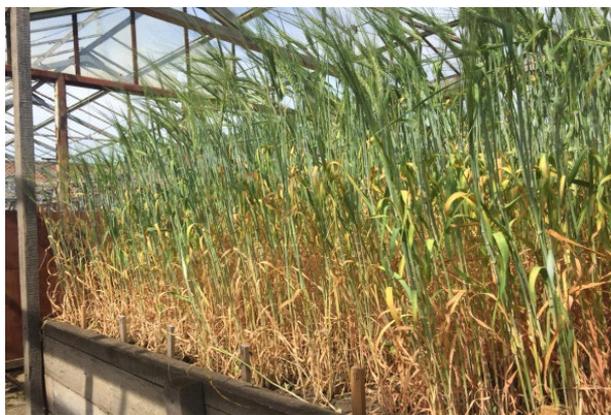


Рис. 1. Вегетационный опыт выращивания сортов пшеницы при различной влагообеспеченности

Fig. 1. Vegetative experience of wheat varieties' growing at different moisture availability

На площадке располагают стеллажи размерами 2 м × 4 м × 0,7 м на 0,6 м от поверхности земли. Делянка имеет 3 ряда площадью 0,45 м² в четырехкратной повторности.

Развитие растений до 4-го этапа органогенеза (формирование колосовых бугорков) проходит в идентичных условиях, затем растения в опытном варианте выращивают в условиях нарастающей засухи (30 % ПВ и ниже), а контроль – при оптимальном увлажнении (70 % ПВ, полив). Фазы развития зерновых колосовых определяли по классификации С. Н. Куликович и Е. Н. Куликович (2014).

Математическую обработку данных производили по методу Б. А. Доспехова (2014) с использованием программы Statistica 10.

Результаты и их обсуждение. Проведен сравнительный анализ динамики содержания пигментов хлорофилла во флаговом листе растений озимой мягкой пшеницы, выращенных при различной влагообеспеченности. Выявлено, что их количественное содержание в растениях в значительной степени зависит от условий произрастания. Это наблюдалось в наших исследованиях, где содержание хлорофиллов *a* и *b* и их сумма значительно варьировали в течение весенне-летней вегетации. Хлорофиллы *a* и *b* являются основными пигментами фотосинтеза растений. Накопление и соотношение разных форм пигментов в хлоропластах могут служить одним из показателей их фотохимической активности. В листьях главных побегов количество хлорофилла *a* в опыте в фазу цветения варьировало от 1,72 до 2,21 мг/100 г сырого вещества, а к фазе молочной спелости зерна эти значения снизились и составили от 1,30 до 2,25 мг/100 г сырого вещества (табл. 1).

Таблица 1. Динамика содержания хлорофилла *a* и *b* в фазы цветения и молочной спелости зерна, мг/100 г сырого вещества (среднее за 2021–2023 гг.)

Table 1. Dynamics of chlorophyll *a* and *b* in the flowering phase and milk-ripe stage of grain, mg/100 g of raw material (average for 2021–2023)

Образцы	Фаза цветения			Фаза молочной спелости			Фаза цветения			Фаза молочной спелости		
	Опыт	Контроль	О/К, %	Опыт	Контроль	О/К, %	Опыт	Контроль	О/К, %	Опыт	Контроль	О/К, %
	«а»	«а»		«а»	«а»		«б»	«б»		«б»	«б»	
Ермак, st	2,06	2,41	85,5	1,50	1,97	76,1	0,51	0,55	92,7	0,45	0,51	88,2
1762/17	2,19	2,68	81,7	2,25	2,87	78,4	0,53	0,64	82,8	0,53	0,47	112,8
2060/17	1,72	2,78	61,9	1,30	2,72	47,8	0,51	0,71	71,8	0,49	0,72	68,1
Аксай	2,21	2,66	83,1	1,93	2,59	74,5	0,53	0,63	84,1	0,56	0,63	88,9
Дончак	1,83	1,93	94,8	1,48	1,90	77,9	0,52	0,50	104	0,57	0,53	107,5
597/18	2,13	2,00	106,5	1,85	2,23	83,0	0,52	0,63	82,5	0,52	0,49	106,1
Разгуляй	1,81	2,30	78,7	1,69	2,21	76,5	0,47	0,54	87,0	0,50	0,55	90,9
Василич	1,74	2,61	66,7	1,57	2,43	64,6	0,61	0,59	103,4	0,49	0,56	87,5
Приволье	1,86	2,69	69,1	1,73	2,48	69,8	0,57	0,60	95,0	0,50	0,58	86,1
1724/18	1,88	2,75	68,4	1,69	2,45	69,0	0,52	0,68	76,5	0,56	0,62	90,3
Флагман	1,92	2,14	89,7	1,54	1,93	79,8	0,52	0,61	85,2	0,44	0,53	86,3
Стандартное отклонение	0,18	0,30	12,84	0,25	0,31	9,31	0,03	0,06	9,72	0,04	0,07	11,91

Превышение значений сохранности хлорофилла *a* в условиях засухи в фазу молочной спелости зерна на величину стандартного отклонения (0,25 мг/100 г сырого вещества)

по сравнению со стандартом Ермак (1,50 мг/100 г сырого вещества) зафиксировано у линий 1762/17 (2,25 мг/100 г сырого вещества), 597/18 (1,85 мг/100 г сырого вещества)

и сорта Аксай (1,93 мг/100 г сырого вещества). Аналогичные закономерности изменений содержания хлорофилла *a* наблюдали и в контроле: в фазу цветения – 1,93–2,78 мг/100 г сырого вещества, а в фазу молочной спелости – 1,90–2,87 мг/100 г сырого вещества.

Несколько иная тенденция наблюдалась при количественном определении содержания хлорофилла *b* в листьях исследуемых сортов в вариантах «опыт» и «контроль» (табл. 1). Высокое содержания пигмента хлорофилла *b* приводит к усилению поглощения коротковолновой области спектра, интенсивному образованию аминокислот и белков, что способствует повышению устойчивости к неблагоприятным условиям внешней среды и в первую очередь к засухе. Одним из показателей при отборе на засухоустойчивость можно рассматривать накопление хлорофилла *b* во флаговом листе.

В фазу цветения в опыте диапазон содержания данного пигмента составил 0,47–0,61 мг/100 г сырого вещества, а в молочную спелость – 0,50–0,71 мг/100 г сырого вещества.

К фазе молочной спелости в условиях засухи максимальное количество хлорофилла *b* на величину стандартного отклонения (0,04 мг/100 г сырого вещества) по сравнению со стандартом Ермак (0,45 мг/100 г сырого вещества) отмечено у сортов и линий: Дончак (0,57 мг/100 г сырого вещества), Аксай и 1724/18 (по 0,56 мг/100 г сырого вещества), 1762/17 (0,53 мг/100 г сырого вещества), 597/18 (0,52 мг/100 г сырого вещества), Разгуляй и Приволье (по 0,50 мг/100 г сырого вещества).

Динамика содержания хлорофилла (*a+b*) в листьях растений пшеницы по сортам (опыт и контроль) в фазу цветения была высокой (2,54 и 3,09 мг/100 г сырого вещества) и снизилась к фазе молочной спелости зерна (2,18 и 2,92 мг/100 г сырого вещества).

Содержание суммарного хлорофилла (*a+b*) у образцов пшеницы в условиях нарастающей засухи в фазы цветения было от 2,34 до 2,28 мг/100 г сырого вещества, а молочной спелости зерна – от 1,99 до 2,43 мг/100 г сырого вещества (рис. 2).

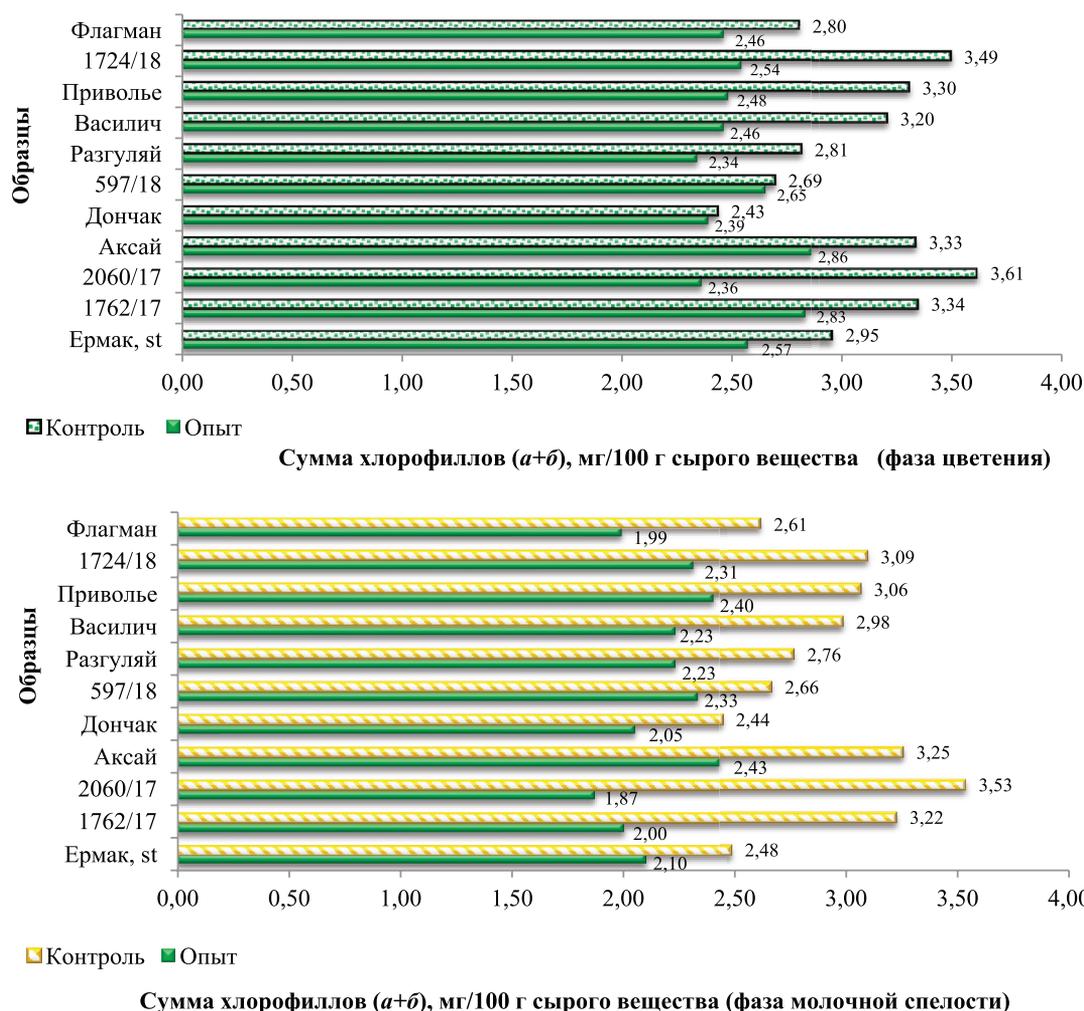


Рис. 2. Изменение содержания хлорофилла *a+b* в фазы цветения и молочной спелости зерна, мг/100 г сырого вещества (среднее за 2021–2023 гг.)

Fig. 2. Change in the content of chlorophyll *a+b* in the flowering phase and milk-ripe stage of grain, mg/100 g of raw material (average for 2021–2023)

Превышение суммарного хлорофилла в опыте в фазу молочной спелости зерна на величину стандартного отклонения (0,18 мг/100 г сырого вещества) над стандартным сортом Ермак (2,10 мг/100 г сырого вещества) отмечено у сортов Аксай (2,43 мг/100 г сырого вещества) и Приволье (2,40 мг/100 г сырого вещества), линий 597/18 (2,33 мг/100 г сырого вещества) и 1724/18 (2,31 мг/100 г сырого вещества).

Содержание суммарного хлорофилла на засухе к контролю во флаговых листьях рассматривается как индикатор засухоустойчивости пшеницы. Наименьшее содержание пигмента хлорофилла (а+б) как в фазу цветения, так и в фазу молочной спелости в засушливых условиях по сравнению с оптимальными было отмечено у сорта Дончак (98,4 и 84,0 на 1,6–16,0 %) и линии 597/18 (98,5 и 87,6 на 1,5–12,4 %) (рис. 3).

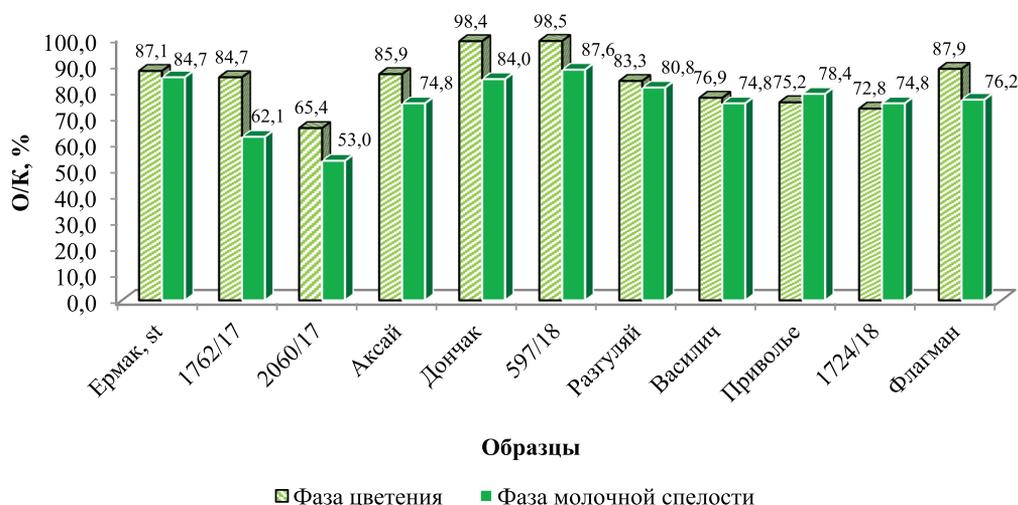


Рис. 3. Изменение суммарного хлорофилла образцов озимой пшеницы в фазы цветения и молочной спелости зерна, % (среднее за 2021–2023 гг.)

Fig. 3. Change in the total chlorophyll of winter wheat samples in the flowering phase and milk-ripe stage of grain, % (average for 2021–2023)

Степень структурной организации фотосинтетического аппарата характеризует показатель соотношения хлорофиллов *a/b*. Так как весь хлорофилл *b* находится в светособирающем комплексе, то чем меньше значение *a/b*, тем больше размеры светособирающего комплекса у растения и выше их адаптивность к неблагоприятным условиям выращивания. Снижение показателя соотношения хлорофиллов *a/b* может характеризовать степень фотохимической активности.

Согласно полученным экспериментальным данным количественного содержания хлорофиллов *a* и *b* во флаговых листьях главного стебля растений пшеницы в ходе дальнейших исследований было рассчитано соотношение между ними (рис. 4).

Анализ приведенных данных показал, что у образцов озимой пшеницы наблюдалось различное соотношение хлорофиллов *a* и *b*, их доли в общей сумме хлорофиллов. Соотношение хлорофиллов *a/b* в фазу цветения колебалось в пределах 2,9–4,2, а в фазу молочной спелости – 2,7–3,5. Минимальное

значение данного показателя в опыте в фазу цветения принадлежало сорту Василич (2,9), а в фазу молочной спелости зерна – линиям 1762/17 и 2060/17 (по 2,7).

Изучаемых сортов озимой пшеницы наблюдались различия по величине урожая в разных условиях выращивания. В опыте урожайность варьировала от 219,8 (Приволье) до 307,7 г/м² (Дончак), в контроле – от 308,5 (Приволье) до 409,9 г/м² (Разгуляй) (табл. 2).

Снижение средних значений урожайности по сортам в условиях недостаточной влагообеспеченности по сравнению с оптимальными условиями составило 22,9 %. Достоверного превышения этих значений стандарта Ермак (264,2 г/м²) среди изучаемых образцов в опыте не выявлено (НСР₀₅ – 62,8 г/м²). Все изучаемые сорта и линии по этому показателю находились на уровне стандарта. Высокие значения зерновой продуктивности в условиях засухи отмечены у образцов Дончак (307,7 г/м²), 1724/18 (296,7 г/м²), Разгуляй (290,7 г/м²), 2060/17 (290,9 г/м²).

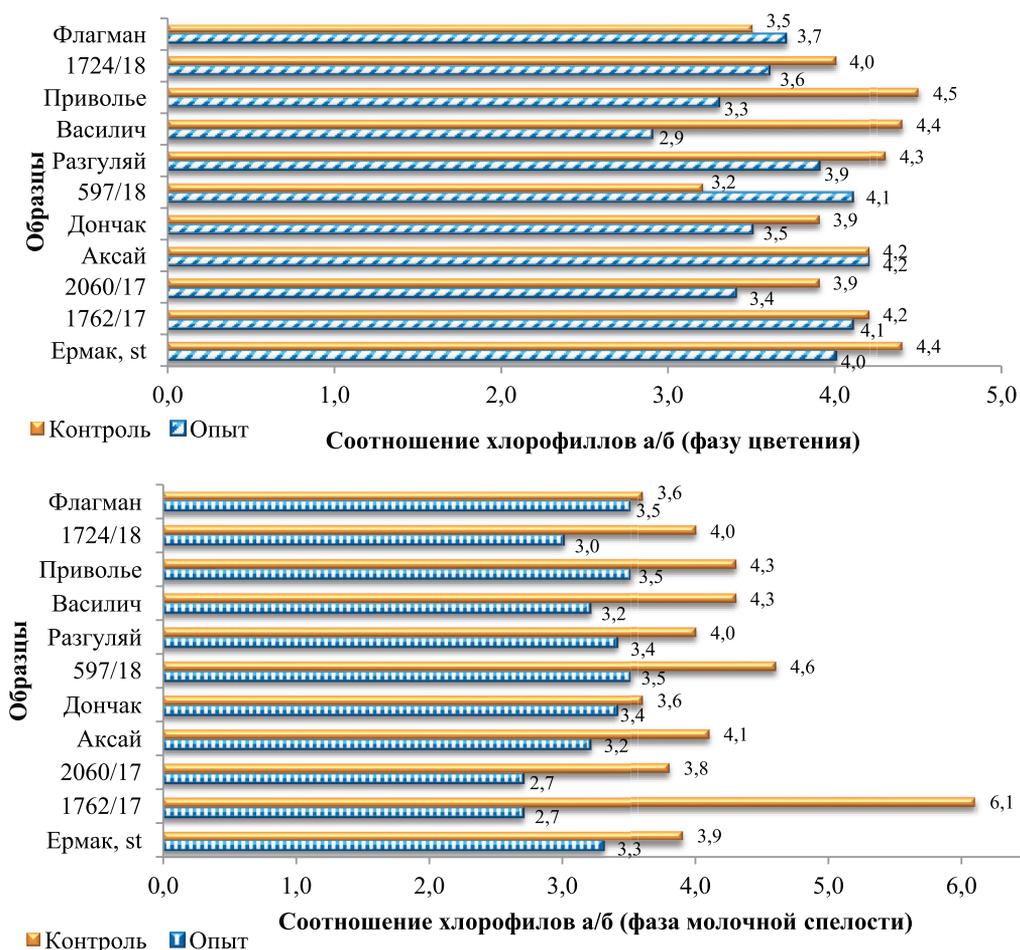


Рис. 4. Соотношение хлорофиллов а/б в фазы цветения и молочной спелости зерна (среднее за 2021–2023 гг.)

Fig. 4. The ratio of chlorophyll a/b in the flowering phase and milk-ripe stage of grain (average for 2021–2023)

Таблица 2. Урожайность озимой пшеницы в условиях вегетационного опыта «засушник» (среднее за 2021–2023 гг.)

Table 2. Winter wheat productivity under arid conditions of vegetation trial (zasushnik) (average for 2021–2023)

Образец	Урожайность, г/м ²		% О/К
	Опыт	Контроль	
Ермак, st	264,2	334,1	79,1
1762/17	285,5	360,5	79,2
2060/17	290,9	367,3	79,2
Аксай	231,9	319,2	72,7
Дончак	307,7	377,9	81,4
597/18	261,0	346,9	75,2
Разгуляй	290,7	409,9	70,9
Василич	274,6	357,7	76,8
Приволье	219,8	308,5	71,2
1724/18	296,7	372,3	79,7
Флагман	279,6	337,9	82,7
Среднее	273,0	353,8	77,1
НСР ₀₅	62,8	90,2	–

Важная роль в обеспечении урожайности растений отводится интенсивной работе пигментного аппарата. Исходя из вышеизложенного, мы проанализировали изменения

соотношения содержания хлорофиллов а+б и а/б и урожайности в условиях засухи по сравнению с оптимальными условиями (табл. 3).

Таблица 3. Соотношение содержания хлорофиллов *a+b* и *a/b* в фазы цветения и молочной спелости и урожайности в условиях засухи по сравнению с оптимальными условиями, % (среднее за 2021–2023 гг.)
Table 3. The ratio of the content of chlorophylls *a+b* and *a/b* in the flowering phase and milk-ripe stage of grain and productivity under drought conditions compared to optimal conditions, % (average for 2021–2023)

Образец	Урожайность	<i>a+b</i>		<i>a/b</i>	
		цветение	молочная спелость	цветение	молочная спелость
Ермак, st	79,1	87,1	84,7	90,9	84,6
1762/17	79,2	84,7	62,1	97,6	44,3
2060/17	79,2	65,4	53,0	87,2	71,1
Аксай	72,7	85,9	74,8	100,0	78,0
Дончак	81,4	98,4	84,0	89,7	94,4
597/18	75,2	98,5	87,6	128,1	76,1
Разгуляй	70,9	83,3	80,8	90,7	85,0
Василич	76,8	76,9	74,8	65,9	74,4
Приволье	71,2	75,2	78,4	73,3	81,4
1724/18	79,7	72,8	74,8	90,0	75,0
Флагман	82,7	87,9	76,2	105,7	97,2

Проведенный сравнительный анализ пигментов фотосинтеза у сортов Дончак, Разгуляй, Флагман и линии 597/18 показал, что высокое накопление суммарного хлорофилла *a+b* в фазы цветения и молочной спелости в листьях растений сопровождалось незначительным снижением урожайности в опыте по сравнению с контролем. Линии 1762/17, 2060/17, 597/18 и 1724/18 характеризуются незначительным снижением урожайности и высокой устойчивостью к засухе.

Корреляционный анализ связи урожайности изучаемых образцов пшеницы и соотношения хлорофиллов *a/b* выявил в фазу цветения слабую достоверную зависимость на 10 %-м уровне урожая зерна от соотношения форм хлорофиллов ($r = -0,25 \pm 0,12$), а в фазу молочной спелости зерна имел среднюю отрицательную достоверную связь на 5%-м уровне ($r = -0,43 \pm 0,18$). Образцы пшеницы, у которых значения соотношений хлорофиллов *a/b* были низкими, характеризовались высокой урожайностью.

Выводы. Проведен анализ по количественному содержанию пигментов фотосинтеза растений озимой мягкой пшеницы, выращенных

в контрастных по влагообеспеченности условиях, что позволило выделить образцы с высокой адаптивной способностью в стрессовых условиях.

Высокое соотношение сохранности зеленых пигментов хлорофилла *a+b* в обе фазы с минимальным снижением урожайности в опыте по сравнению с контролем зафиксировано у сортов Дончак (98,4, 84,0 и 81,4 % соответственно), Разгуляй (83,3, 80,8 и 70,9 % соответственно), Флагман (87,9, 76,2 и 82,7 % соответственно) и линии 597/18 (98,5, 87,6 и 75,2 % соответственно).

Низкие значения соотношения хлорофилла *a/b* и незначительное снижение урожайности в условиях засухи к оптимальным условиям отмечено у линии 1762/17 (43,3 и 79,2 %), 2060/17 (71,1 и 79,2 %), 597/18 (76,1 и 75,2 %) и 1724/18 (75,0 и 79,7 %), характеризующихся высокой устойчивостью к засухе. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности использования показателей пигментов хлорофилла в качестве признаков, связанных с засухоустойчивостью и высокой урожайностью.

Библиографические ссылки

1. Амунова О. С., Лисицын Е. М. Влияние различных условий увлажнения на пигментный комплекс листьев сортов мягкой яровой пшеницы разных групп спелости // Самарский научный вестник. 2019. № 8(28). С. 19–24.
2. Газе В. Л., Голубова В. А., Лобунская И. А. Развитие листового аппарата растений и содержание хлорофилла как показатель отзвучивости на увлажнение и устойчивости к засухе образцов озимой мягкой пшеницы. Зерновое хозяйство России. 2021. № 6. С. 9–14. DOI: 10.31367/2079-8725-2021-78-6-9-14
3. Голева Г. Г., Ващенко Т. Г., Крюкова Т. И., Голев А. Д. Роль флаговых листьев в формировании продуктивности растений озимой пшеницы (*Triticum Aestivum* L.) // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2016. № 2(49). С. 31–42. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.2.31
4. Гузенко А. Ю., Солонкин А. В., Донцова А. А. Сравнительный анализ фотосинтетического потенциала новых сортов ярового ячменя в зоне засушливого климата Нижнего Поволжья // Зерновое хозяйство России. 2024. № 2. С. 88–97. DOI: 10.31367/2079-8725-2024-91-2-88-97
5. Калинина А. В., Лящева С. В. Состав и содержание пигментов фотосинтеза в листьях проростков озимой мягкой пшеницы // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20, № 2(2). С. 286–290.
6. Куликович С. Н., Куликович Е. Н. Диагностика стадий развития озимой пшеницы по шкале BVCSN. Минск: Наша Идея, 2014. 23 с.

7. Лиховидова В. А., Газе В. Л., Ионова Е. В. Влияние фотосинтетического пигмента хлорофилла при различной влагообеспеченности на продуктивность растений озимой мягкой пшеницы // *Аграрная наука*. 2020. № 7–8. С. 86–89. DOI: 10.32634/0869-8155-2020-340-7-86-89

8. Маймистов В. В., Осипов Ю. Ф., Чумаковский Н. Н., Евтушенко Ю. В. Ускоренная оценка засухоустойчивости селекционного материала // *Селекция и семеноводство*. 1988. № 3. С. 23–25.

9. Синеговская В. Т., Низкий С. Е., Науменко Е. Е. Хлорофилл как критерий устойчивости растений сои к длительному затоплению почвы // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022. № 23(6). С. 788–795. DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.6.788-795

10. Тютерева Е. В., Дмитриева В. А., Войцеховская О. В. Хлорофилл b как источник сигналов, регулирующих развитие и продуктивность растений // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. № 52(5). С. 843–855. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.5.843rus

11. Шестакова Е. О., Ерошенко Ф. В., Сторчак И. Г., Оганян Л. Р., Чернова И. В. Влияние различных элементов технологии возделывания на содержание хлорофилла в растениях озимой пшеницы и ее урожайность // *Аграрный вестник Урала*. 2020. № 05(196). С. 27–37. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-196-5-27-37

12. Шматько И. Г., Шаповал А. И., Шевчук Н. В. Устойчивость зеленых пигментов к водному дефициту и повышенным температурам. Методы оценки устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды. М.: Колос, 1976. С. 48–54.

13. Gu J., Zhou Z., Li Z., Chen Y., Wang Z., Zhang H., Yang J. Photosynthetic Properties and Potentials for Improvement of Photosynthesis in Pale Green Leaf Rice under High Light Conditions // *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8, Article number: 1082. DOI: 10.3389/fpls.2017.01082

14. Zhao W., Liu L., Shen Q., Yang J., Han X., Tian F., Wu J. Effects of Water Stress on Photosynthesis, Yield, and Water Use Efficiency in Winter Wheat // *Water*. 2020. Vol. 12(8), Article number: 2127. DOI: 10.3390/w12082127

15. Yang B., Wen X., Wen H., Feng Y., Zhao J., Wu B., ... and Zheng J. Identification of Genetic Loci Affecting Flag Leaf Chlorophyll in Wheat Grown under Different Water Regimes // *Frontiers in Genetics*. 2022. Vol. 13, Article number: 832898. DOI: 10.3389/fgene.2022.832898

References

1. Amunova O. S., Lisitsyn E. M. Vliyaniye razlichnykh uslovii uvlazhneniya na pigmentnyi kompleks list'ev sortov myagkoi yarovoi pshenitsy raznykh grupp spelosti [The effect of different moisture conditions on the pigment complex of leaves of spring common wheat varieties of different maturity groups] // *Samarskii nauchnyi vestnik*. 2019. № 8(28). S. 19–24.

2. Gaze V. L., Golubova V. A., Lobunskaya I. A. Razvitiye listovogo apparata rastenii i sodержanie khlorofilla kak pokazatel' otzyvchivosti na uvlazhnenie i ustoichivosti k zasukhe obraztsov ozimoi myagkoi pshenitsy [Development of plant leaves and chlorophyll as an indicator of responsiveness to moisture and resistance to drought of winter common wheat samples] // *Zernovoe khozyaistvo Rossii*. 2021. № 6. S. 9–14. DOI: 10.31367/2079-8725-2021-78-6-9-14

3. Goleva G. G., Vashchenko T. G., Kryukova T. I., Golev A. D. Rol' flagovykh list'ev v formirovaniy produktivnosti rastenii ozimoi pshenitsy (*Triticum Aestivum* L.) [The role of flag leaves in the formation of plant productivity of winter wheat (*Triticum Aestivum* L.)] // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016. № 2(49). S. 31–42. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.2.31

4. Guzenko A. Yu., Solonkin A. V., Dontsova A. A. Sravnitel'nyi analiz fotosinteticheskogo potentsiala novykh sortov yarovogo yachmenya v zone zasushlivogo klimata Nizhnego Povolzh'ya [Comparative analysis of the photosynthetic potential of new spring barley varieties in the arid climate area of the Lower Volga region] // *Zernovoe khozyaistvo Rossii*. 2024. № 2. S. 88–97. DOI: 10.31367/2079-8725-2024-91-2-88-97

5. Kalinina A. V., Lyashcheva S. V. Sostav i sodержanie pigmentov fotosinteza v list'yakh prorstkov ozimoi myagkoi pshenitsy [Composition and content of photosynthesis pigments in leaves of winter common wheat sprouts] // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2018. T. 20, № 2(2). S. 286–290.

6. Kulikovich S. N., Kulikovich E. N. Diagnostika stadii razvitiya ozimoi pshenitsy po shkale BBCH [Diagnostics of the development stages of winter wheat using the BBCH scale]. Minsk: Nasha Ideya, 2014. 23 s.

7. Likhovidova V. A., Gaze V. L., Ionova E. V. Vliyaniye fotosinteticheskogo pigmenta khlorofilla pri razlichnoi vlagoobespechennosti na produktivnost' rastenii ozimoi myagkoi pshenitsy [The effect of the photosynthetic pigment chlorophyll on the productivity of winter common wheat plants at different moisture levels] // *Agrarnaya nauka*. 2020. № 7–8. S. 86–89. DOI: 10.32634/0869-8155-2020-340-7-86-89

8. Maimistov V. V., Osipov Yu. F., Chumakovskii N. N., Evtushenko Yu. V. Uskorennaya otsenka zasukhoustoichivosti selektsionnogo materiala [Accelerated estimation of drought resistance of breeding material] // *Selektsiya i semenovodstvo*. 1988. № 3. S. 23–25.

9. Sinegovskaya V. T., Nizkii S. E., Naumenko E. E. Khlorofill kak kriterii ustoichivosti rastenii soi k dlitel'nomu zatopleniyu pochvy [Chlorophyll as a criterion for the resistance of soybean plants to long-term soil flooding] // *Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka*. 2022. № 23(6). S. 788–795. DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.6.788-795

10. Tyutereva E. V., Dmitrieva V. A., Voitsekhovskaya O. V. Khlorofill b kak istochnik signalov, reguliruyushchikh razvitiye i produktivnost' rastenii [Chlorophyll b as a source of signals regulating plant development and productivity] // *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*. 2017. № 52(5). S. 843–855. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.5.843rus

11. Shestakova E. O., Eroshenko F. V., Storchak I. G., Oganyan L. R., Chernova I. V. Vliyaniye razlichnykh elementov tekhnologii vozdelevaniya na sodержanie khlorofilla v rasteniyakh ozimoi pshenitsy i ee urozhainost' [The effect of various cultivation technologies on the chlorophyll content

in winter wheat plants and its productivity] // Agrarnyi vestnik Urala. 2020. № 05(196). S. 27–37. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-196-5-27-37

12. Shmat'ko I. G., Shapoval A. I., Shevchuk N. V. Ustoichivost' zelenykh pigmentov k vodnomu defitsitu i povyshennym temperaturam [Resistance of green pigments to water deficiency and high temperatures]. Metody otsenki ustoichivosti rastenii k neblagopriyatnym usloviyam sredy. M.: Kolos, 1976. S. 48–54.

13. Gu J., Zhou Z., Li Z., Chen Y., Wang Z., Zhang H., Yang J. Photosynthetic Properties and Potentials for Improvement of Photosynthesis in Pale Green Leaf Rice under High Light Conditions // Frontiers in Plant Science. 2017. Vol. 8, Article number: 1082. DOI: 10.3389/fpls.2017.01082

14. Zhao W., Liu L., Shen Q., Yang J., Han X., Tian F., Wu J. Effects of Water Stress on Photosynthesis, Yield, and Water Use Efficiency in Winter Wheat // Water. 2020. Vol. 12(8), Article number: 2127. DOI: 10.3390/w12082127

15. Yang B., Wen X., Wen H., Feng Y., Zhao J., Wu B., ... and Zheng J. Identification of Genetic Loci Affecting Flag Leaf Chlorophyll in Wheat Grown under Different Water Regimes // Frontiers in Genetics 2022. Vol. 13, Article number: 832898. DOI: 10.3389/fgene.2022.832898

Поступила: 09.07.24; доработана после рецензирования: 26.07.24; принята к публикации: 26.07.24.

Критерии авторства. Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад. Лобунская И. А., Газе В. Л. – концептуализация исследования, анализ данных и их интерпретация, подготовка рукописи; Черпакова Е. Ю., Яновская Н. В. – проведение лабораторных и вегетационного опытов; Подгорный С. В., Зеленская Г. М. – концептуализация исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.