

Н.А. Сурин, академик РАН

А.Г. Липшин, кандидат сельскохозяйственных наук

Л.В. Плеханова, кандидат сельскохозяйственных наук

Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства

РФ, 660002, г. Красноярск, пр. Свободный, 66

А.А. Тихомиров, доктор биологических наук, профессор

В.В. Величко, кандидат биологических наук

Институт биофизики СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН

РФ, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/50

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева

РФ, 660037, г. Красноярск, пр. им. газеты Красноярский рабочий, 31

С.А. Ушакова, кандидат биологических наук

В.Н. Шихов, кандидат биологических наук

А.М. Павлова, инженер

Е.С. Шклавцова, кандидат биологических наук

Институт биофизики СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН

E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru

УДК 631.52

DOI: 10.30850/vrsn/2021/4/8-12

ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ СВЕТОКУЛЬТУРЫ, ИМИТИРУЮЩИХ СВЕТО-ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ РЕГИОНА КУЛЬТИВИРОВАНИЯ

Цель исследований — в контролируемых условиях светокультуры, максимально приближенных к усредненным свето-температурным условиям районирования (опытное хозяйство «Минино» Красноярского края) выяснить потенциально возможные продукционные характеристики растений пшеницы сорта Красноярская 12, что в дальнейшем позволит установить лимитирующие факторы среды, влияющие на недобор урожая и снижение его качества в выбранных регионах культивирования. Для достижения цели пшеницу выращивали методом гидропоники на керамзите в контролируемых условиях среды: интенсивность фотосинтетической радиации (ФАР) — 690 ± 70 мкмоль/м²с; фотопериод — 17 ч света и 7 ч темноты. Для оценки состояния растений на разных фазах роста и развития проанализированы: морфометрические характеристики; показатели состояния фотосинтетического аппарата листьев всех ярусов главного побега; биомасса; показатели CO₂-газообмена ценоза. Проведена сравнительная характеристика урожая пшеницы сорта Красноярская 12, выращенного в условиях светокультуры и на полях опытного хозяйства «Минино» в 2020 году. Установлено, что лимитирующий фактор повышения продуктивности сорта в полевых условиях — ускоренное прохождение отдельных межфазных и вегетационного периодов, по сравнению со светокulturой. Более растянутый период вегетации в светокulturе связан, в первую очередь, с длительным прохождением фазы куцения, во время которого дифференцируются первичные бугорки и закладывается колос. Полученные результаты выращивания растений пшеницы в светокulturе раскрывают потенциальную продуктивность сорта, которая не может быть реализована в биоклиматических условиях опытного хозяйства.

Ключевые слова: Красноярский край, опытное хозяйство «Минино», пшеница сорта Красноярская 12, светокultura растений, рост и развитие растений, урожайность.

N.A. Surin, Academician of the RAS

A.G. Lipshin, PhD in Agricultural sciences

L.V. Plekhanova, PhD in Agricultural sciences

Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture

RF, 660002, g. Krasnoyarsk, pr. Svobodnyj, 66

A.A. Tikhomirov, Grand PhD in Biological sciences, Professor

V.V. Velichko, PhD in Biological sciences

Institute of Biophysics SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS»

RF, 660036, g. Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/50

M.F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

RF, 660037, g. Krasnoyarsk, pr. im. gazety`Krasnoyarskij rabochij, 31

S.A. Ushakova, PhD in Biological sciences

V.N. Shikhov, PhD in Biological sciences

A.M. Pavlova, engineer

E.S. Shklavtsova, PhD in Biological sciences

Institute of Biophysics SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS»

E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru

PHOTOSYNTHETIC PRODUCTIVITY OF WHEAT UNDER PHOTOCULTURE CONDITIONS SIMULATING THE LIGHT-TEMPERATURE REGIME OF THE CULTIVATION REGION

The aim of the research was to find out the potential production characteristics of the Krasnoyarsk 12 variety wheat plants under light culture controlled conditions, as close as possible to the average light-temperature conditions of zoning (the experimental farm «Minino»

of the Krasnoyarsk Territory), which in the future will allow us to determine the limiting environmental factors that affect the shortage of the crop and the decrease in its quality in the selected cultivation regions. To achieve this goal, wheat was grown by hydroponics on expanded clay under controlled environmental conditions at the intensity of photosynthetic radiation (PAR) (690 ± 70) $\text{mmol/m}^2 \text{ s}$ and at the photoperiod of 17 hours of light and 7 hours of darkness. To assess the state of plants at different stages of growth and development, we analyzed the morphometric characteristics of plants, the indicators of the state of the photosynthetic apparatus of leaves of all tiers of the main shoot of plants, plant biomass in different growth periods, indicators of CO_2 -gas exchange of canopies. A comparative characteristic of the yields of wheat plants of the variety Krasnoyarsk 12, grown in the conditions of light culture and in the fields of the experimental farm «MININO» in 2020, was carried out. It was established that the limiting factor of increasing the productivity of the variety in the field appeared to be the accelerated passage of individual interphase periods and the growing season as a whole in comparison with light culture. A longer growing season in light culture was primarily associated with a longer passage of the tillering phase, during which the primary tubercles were differentiated and the ear was laid. The obtained results of growing wheat plants in light culture more fully revealed the potential limits of productivity of the variety Krasnoyarsk 12. Those results were convincing evidence that the bioclimatic resources of the experimental farm «Minino» of the Krasnoyarsk Territory did not allow realizing the potential productivity of the variety and at the same time indicated the possibility of reducing the effects of limiting factors aimed at its implementation in production conditions.

Key words: Krasnoyarsk Territory, the experimental farm «Minino», wheat of the variety Krasnoyarsk 12, plant light culture, plant growth and development, yield.

При включении в Госреестр РФ новых сортов культурных растений важно оценить возможность реализации их потенциала в климатических условиях намеченного региона. Это становится возможным в полностью контролируемых условиях светокультуры, когда все лимитирующие факторы внешней среды отсутствуют и формирование урожая определяется только физиологическими особенностями роста и развития растений. В результате можно скорректировать дальнейшую селекционную работу на повышение устойчивости данного образца к действию неблагоприятного фактора, либо сменить регион районирования.

Одна из наиболее ценных культур для человека, селекция которой насчитывает более двух тысячелетий, – пшеница. Выведение ее сортов для регионов Сибири в связи с зоной рискованного земледелия приобретает особенно важное значение.

Цель исследования – выяснить потенциально возможные продукционные характеристики растений пшеницы сорта *Красноярская 12* в контролируемых условиях светокультуры, максимально приближенных к усредненному свето-температурному режиму ОПХ «Минино» Красноярского края, что в дальнейшем позволит установить лимитирующие факторы среды, влияющие на недобор урожая и снижение его качества.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследований – пшеница сорта *Красноярская 12*. [2, 3] Растения выращивали в герметизируемой вегетационной камере с регулируемой параметрами внешней среды (температура и относительная влажность воздуха, интенсивность фотосинтетически активной радиации). Объем камеры – 3 м³, высота – 1,3 м. Источники света (лампы ДРФ – 1000) устанавливали снаружи. [5] Между ними и растениями находился прозрачный потолок из органического стекла с проточной водой, поглощающий значительную часть инфракрасной радиации. Для полива растений к вегетационной камере был подсоединен бак с насосом для подачи питательного раствора методом подтопления. Концентрацию CO_2 регистрировали газоанализатором LI-820 (LI-COR, США) со шкалой измерения 0–2000 ppm.

Для моделирования свето-температурных условий произрастания пшеницы использовали метеоданные опытного хозяйства НИИСХ ФИЦ «Минино». [6, 7] Фотопериод вегетационного периода (июнь–июль) – 17 ч света и 7 ч темноты. Интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) – 690 ± 70 мкмоль/м² с, температура воздуха днем – $25 \pm 1^\circ\text{C}$, ночью – $14 \pm 1^\circ\text{C}$. Площадь посева – 0,6 м². Концентрация CO_2 – 400 ppm. Метод выращивания – гидропоника на керамзите. Питательный раствор готовили на смеси Кнопа с добавками микроэлементов и цитрата железа.

Чтобы оценить условия освещения и состояния растений проанализировали: интенсивность ФАР на разных ярусах ценоза в зависимости от возраста растений; морфометрические характеристики; показатели состояния фотосинтетического аппарата листьев всех ярусов главного побега; биомассу в разные периоды роста; показатели CO_2 -газообмена ценоза; урожай пшеницы сорта *Красноярская 12*, выращенный в полностью контролируемых условиях светокультуры в ИБФ СО РАН ФИЦ и на полях опытного хозяйства «Минино» НИИСХ ФИЦ г. Красноярск.

Интенсивность ФАР определяли квантометром LI-250A (Li-COR, США) на уровне листовых пластинок каждого яруса листьев главного побега пшеницы по мере роста растений.

Спектры излучения измеряли спектрометром AvaSpec-ULS2048-USB2 (Avantes, Нидерланды). На 30-е сутки на уровне большинства нижних ярусов листьев диагностику прекращали из-за роста боковых побегов.

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях главного побега пшеницы определяли на спектрофотометре UV-2804 (UNICO, США), рассчитывали по формулам Wintermans, DeMots. [1] Аналитическая повторность трехкратная. Экстрагировали пигменты 96 % этанолом.

Показатели газообмена оценивали по скорости изменения концентрации CO_2 в диапазоне 350..450 ppm в течение светового дня после герметизации камеры, Рвид. (видимая скорость поглощения CO_2) – по скорости изменения концентрации CO_2 , R (дыхание на свету) – по скорости изменения концентрации CO_2 в первые 30 мин. после выключения света, Рфакт. (фактическое поглощение CO_2) равно сумме Рвид. и R.

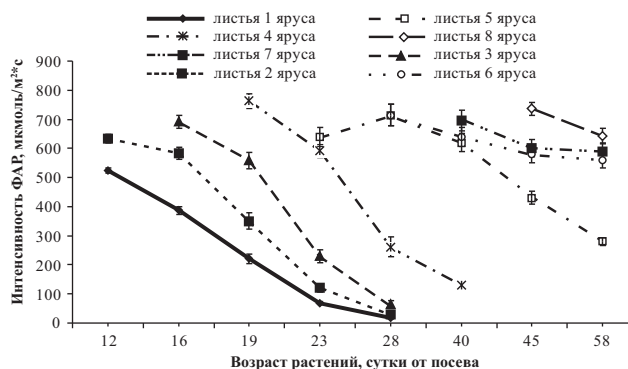


Рис. 1. Интенсивность ФАР на уровне листьев разных ярусов главного побега в зависимости от возраста растений.

Анализ процессов роста, развития и формирования фотосинтетического аппарата растений были сделаны на различных уровнях организации ценоза.

Статистические результаты обрабатывали общепринятыми методами с помощью Microsoft Excel. Средние значения найдены при избранной доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Интенсивность ФАР для каждого из ярусов листьев пшеницы имеет похожую возрастную динамику (рис. 1). Во время разворачивания листовой пластинки лист находится наверху ценоза и получает установленное количество светового излучения. По мере роста и развития растений листья постепенно начинают испытывать затенение от листьев вышерасположенных ярусов и активно растущих боковых побегов. К 30-суточному возрасту с мо-

мента посева растений листья нижних трех ярусов оказались в условиях сумеречного освещения. С появлением 6, 7 и 8-го листьев нижележащим (4-й и 5-й) также не хватало света.

Морфология и биомасса растений. Фаза формирования зародышевых листьев длилась примерно 2 нед., кушениа – около 26 сут., на 40-е сут. начался выход в трубку. К этому возрасту побегообразование у растений почти закончилось, на главном побеге формируются все листья (табл. 1).

В фазах выхода в трубку и колошения значения сырой и сухой массы вегетативных органов максимальные, в фазе молочной спелости сырая масса уменьшилась. Достоверных изменений сухой массы вегетативных органов в фазах от выхода в трубку до цветения не было. При молочной спелости сухая масса уменьшилась на 27 % по сравнению с массой в фазе цветения. При этом сухая масса колоса увеличилась более чем в 4,5 раза (рис. 2).

Сырая масса растений пшеницы увеличивалась до фазы выхода в трубку, а сухая при формировании репродуктивных органов главного и боковых побегов (рис. 3).

Состояние фотосинтетического аппарата листьев главного побега растений. Наибольшая фотосинтезирующая площадь была у листьев 4 и 5-го ярусов главного побега, меньшая – 1 и 2-го: 37 и 51 % площади листьев 4-го яруса соответственно (рис. 4).

Площади листьев 3, 6, 7 и 8-го ярусов примерно на 15 % меньше, чем у листьев 4-го яруса. Максимальная сырая масса у листьев 5, 6, и 7-го ярусов. Чем позже листья сформированы, тем больше у них масса сухого вещества (рис. 4).

В процессе роста и формирования листьев главного побега наблюдали периоды значительного увеличения содержания пигментов и когда

Таблица 1. Морфология растений пшеницы сорта *Красноярская 12* в условиях светокультуры (на одно растение)

Возраст от посева (всходов), сут.	Фаза развития	Количество живых листьев на главном побеге, шт.	Количество живых побегов, шт.	Высота до кончика верхнего листа, см	Длина стебля, см
12 (9)	Всходы	2...3		27±2,9	7±0,5
16 (13)	Кушениа	3...4	3±1	32±2,6	8±0,7
40 (37)	Выход в трубку	7...8	7±1	85±3,5	54±1,2
53 (50)	Колошение	7	8±1	115±5,1	87±1,6
58 (55)	Цветение	6	8±1	113±3,1	101±1,7
77 (74)	Молочная спелость	5	6±1	120±7,2	108±5,3

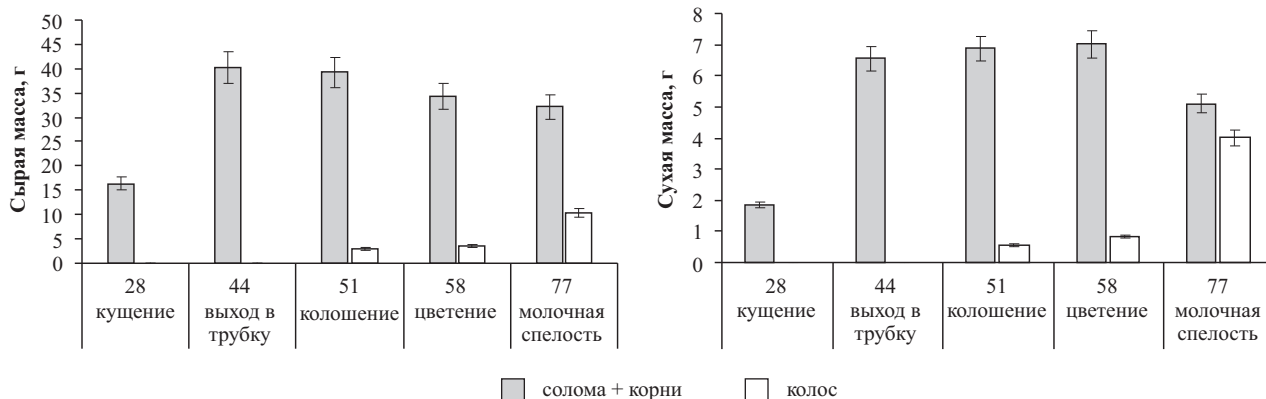


Рис. 2. Сырая и сухая масса вегетативных и репродуктивных органов пшеницы в разные фазы роста и развития растений.

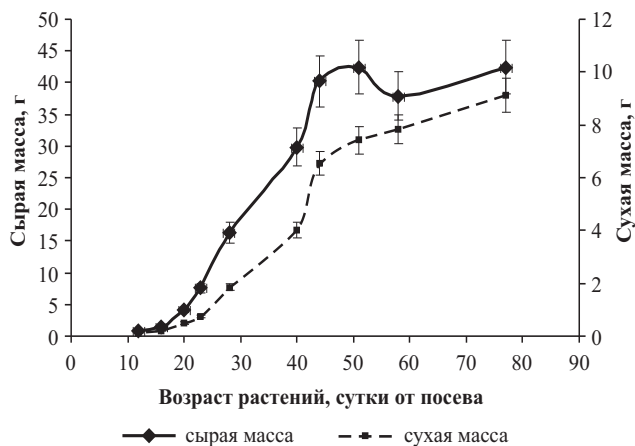


Рис. 3. Сырая и сухая масса растений в зависимости от возраста (на одно растение).

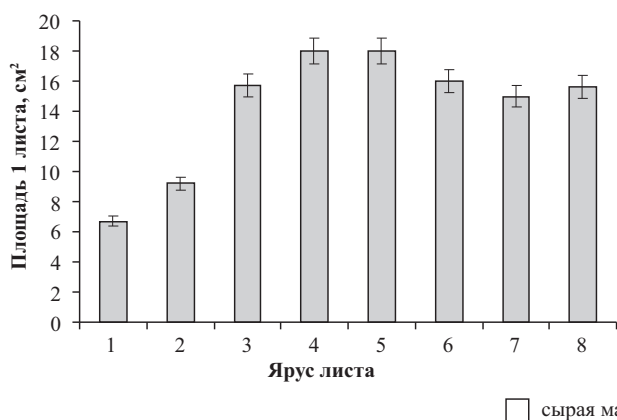


Рис. 4. Площадь, сырая и сухая масса сформированных листьев разных ярусов главного побега.

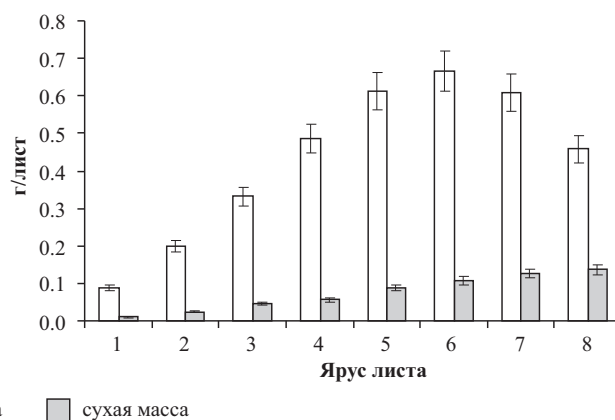
их количество достоверно не менялось, что связано с формированием новых листьев и потерей пигментов более старыми (рис. 5).

Через 50 сут. после посева растений суммарное содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях главного побега стало уменьшаться. В фазе молочной спелости количество зеленых пигментов снизилось на 46 %, каротиноидов – 55 %, по сравнению с листьями в возрасте 44 сут. [4]

Составляющие CO₂-газообмена в дневное время суток. До 30-суточного возраста интенсивность видимого фотосинтеза ценоза пшеницы росла, как и биомасса растений, по S-образной кривой (рис. 6). На 34-е сутки листья приблизились к потолку камеры, и для выравнивания интенсивности ФАР поддон опустили на 20 см. Интенсивность ФАР верхних листьев осталась равна 690 мкмоль/м²с, но освещенность нижележащих уменьшилась, что привело к снижению видимого фотосинтеза (рис. 6). Через трое суток растения адаптировались к новым условиям: увеличилось содержание зеленых пигментов в листьях 5 и 6-го ярусов, продолжил развиваться 8-й лист, величина видимого фотосинтеза ценоза восстановилась. На 44 сут., после очередного выравнивания ФАР на уровне верхних листьев, видимый фотосинтез уменьшился с 264 до 155 ммоль/м² ч (рис. 6). Максимальные значения фактического фотосинтеза ценоза пшеницы зафиксированы на 30...37-е сут.

Таблица 2. Сравнительная оценка урожая растений пшеницы сорта Красная 12, выращенного в светокультуре и в полевых условиях (2020 год)

Показатель	Условия	
	полевые	светокультуры
Вегетационный период, сут.	90	105
Высота растений, см	109±5	124±1,5
Число зерен в колосе, шт.	29,6±1,8	43,0±2,7
Масса 1000 зерен, г	38,4±2,5	34,5±1,7
Продуктивная кустистость, шт.	1,31±0,3	3,82±0,17
Урожайность зерна, кг/м ²	0,41±0,09	1,83±0,19
Натура, г/л	777±20	710±20
Биохимические характеристики урожая зерна, %		
белок	13,8±1,2	17,8±1,3
клейковина	30,0±2,1	43,1±2,5
углеводы	66,5±0,5	65,5±0,5
липиды	0,8±0,1	2,3±0,2



На дыхание растений до фазы выхода в трубку тратилось около 30 % общего связанного в процессе фотосинтеза CO₂. Соотношение количества CO₂, выделившегося при дыхании, к пошедшему на прирост биомассы, находилось в пределах 42...36 %.

При выравнивании интенсивности ФАР на уровне верхних листьев главного побега дыхание, несмотря на снижение фотосинтетических процессов, фак-

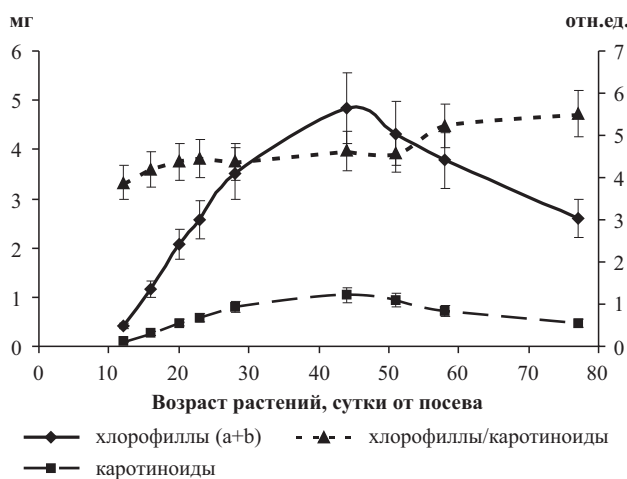


Рис. 5. Суммарное содержание хлорофиллов, каротиноидов и их соотношение в листьях главного побега растений пшеницы в зависимости от возраста.

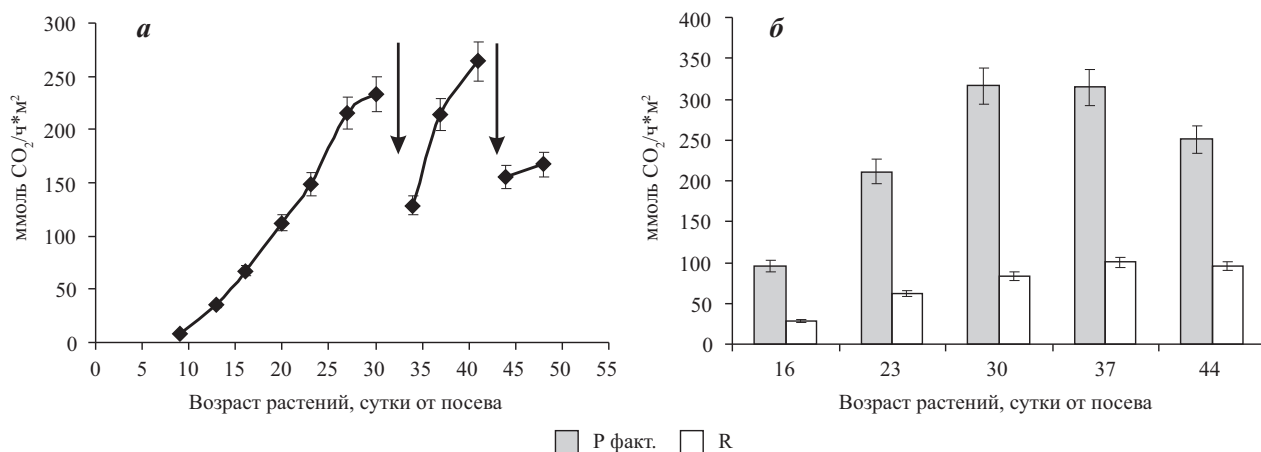


Рис. 6. Видимый фотосинтез (а) и CO₂-газообмен (б) пшеницы в течение светового дня в зависимости от возраста растений. Стрелками указано выравнивание интенсивности ФАР на уровне верхних листьев главного побега. Рфакт. — фактический фотосинтез, R — дыхание.

тически не изменялось, что привело к увеличению затрат на него почти до 40 %, связанного в процессе фотосинтеза CO₂, а соотношение количества CO₂, выделившегося при дыхании и CO₂, пошедшего на прирост биомассы, выросло до 62 %.

Сравнительная оценка урожая растений выращенных в светокультуре и полевых условиях. Лимитирующий фактор повышения продуктивности сорта в полевых условиях ОПХ «Минино» — ускоренное прохождение отдельных межфазных и вегетационного периодов. Более растянутый период вегетации в условиях светокультуры связан с длительностью фазы кушения, во время которой дифференцируются первичные бугорки и закладывается колос (табл. 2).

В полевых условиях продолжительность фазы кушения сорта *Красноярская 12* составляет 7...10 сут., в условиях светокультуры — 24 сут. Число продуктивных стеблей в условиях светокультуры втрое больше, соответственно возрастает и средняя озерненность колоса (43,0 и 29,6 шт. соответственно). Качество зерна также было существенно выше.

Полученные результаты выращивания растений пшеницы в светокультуре раскрывают потенциальную продуктивность сорта *Красноярская 12*, которая не может быть полностью реализована в биоклиматических условиях ОПХ «Минино», установлены лимитирующие факторы среды, влияющие на недобор урожая и снижение его качества.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гавриленко, В.Ф. Большой практикум по фотосинтезу / В.Ф. Гавриленко, Т.В. Жигалова. — М.: Издательский центр «Академия», 2003. — 51 с.
2. Сидоров, А.В. Адаптивный сорт яровой мягкой пшеницы *Красноярская 12* / А.В. Сидоров, Н.А. Нешумаева, Л.В. Плеханова. // Вестник КрасГАУ. — 2020. — № 4. — С. 10–15.

3. Сидоров, А.В. Селекция яровой пшеницы в Красноярском крае / А.В. Сидоров: монография. — Красноярск: ФГБНУ ФИЦ «Красноярский НЦ Сибирского отделения РАН», 2018. — 208 с.
4. Lichtenthaler, H.K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes / H.K. Lichtenthaler // Methods in Enzymology. Ed. S.P. Colowick. — N.O. Kaplan. San Diego: Academic Press, 1987. — P. 331.
5. Tikhomirov, A.A. Conceptual Approach to Selecting Radiation Spectrum of Lamps for Plant Cultivation / A.A. Tikhomirov, S.A. Ushakova, V.N. Shikhov, E.S. Shklavtsova // Light & Engineering. — 2019. — Vol. 27. — № 6. Special Issue. — P. 24–30.
6. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
7. <http://timezone.ru/suncalc.php?tid=62>.

LIST OF SOURCES

1. Gavrilenko, V.F. Bol'shoj praktikum po fotosintezu / V.F. Gavrilenko, T.V. Zhigalova. — M.: Izdatel'skij centr «Akademiya», 2003. — 51 s.
2. Sidorov, A.V. Adaptivnyj sort yarovoij myagkoj pshenicy *Krasnoyarskaya 12* / A.V. Sidorov, N.A. Neshumaeva, L.V. Plekhanova. // Vestnik KrasGAU. — 2020. — № 4. — S. 10–15.
3. Sidorov, A.V. Selekcija yarovoij pshenicy v Krasnoyarskom krae / A.V. Sidorov: monografiya. — Krasnoyarsk: FGBNU FIC «Krasnoyarskij NC Sibirskogo otdeleniya RAN», 2018. — 208 s.
4. Lichtenthaler, H.K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes / H.K. Lichtenthaler // Methods in Enzymology. Ed. S.P. Colowick. — N.O. Kaplan. San Diego: Academic Press, 1987. — P. 331.
5. Tikhomirov, A.A. Conceptual Approach to Selecting Radiation Spectrum of Lamps for Plant Cultivation / A.A. Tikhomirov, S.A. Ushakova, V.N. Shikhov, E.S. Shklavtsova // Light & Engineering. — 2019. — Vol. 27. — № 6. Special Issue. — P. 24–30.
6. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
7. <http://timezone.ru/suncalc.php?tid=62>.