

ВЛИЯНИЕ БИОУДОБРЕНИЯ НА ВОДНЫЙ РЕЖИМ, ИНТЕНСИВНОСТЬ ФОТОСИНТЕЗА И УРОЖАЙНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ СТЕПНОГО ПРЕДУРАЛЬЯ

Д. Г. Федорова, кандидат биологических наук, директор ботанического сада, старший научный сотрудник научно-образовательного центра «Биологические системы и нанотехнологии», DaryaOrlova24@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0002-5323-4965;
Л. В. Галактионова, кандидат биологических наук, заведующий кафедрой биологии и почвоведения, ORCID ID: 0000-0003-0781-3752
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»,
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, д. 13

Зерновые культуры имеют важное продовольственное значение, урожайность которых во многом зависит от водного режима и ассимиляционной активности растений. Цель исследования – определить влияние биоудобрения на параметры водного режима, пигментного аппарата и газового состава растений зерновых культур. Исследования были проведены в период 2021–2023 гг. на базе стационарного научного полигона ботанического сада Оренбургского государственного университета. Объектами исследования послужили сорт ярового ячменя Анна, сорт пшеницы мягкой яровой Оренбургская юбилейная и сорт пшеницы твердой яровой Оренбургская. При проведении эксперимента использовали биоудобрение, содержащее ферментированные пищевые отходы и измельченные отходы растениеводства с иммобилизованными на их поверхности бактериями *B. Subtilis*. Параметры водного режима исследовали согласно методике Н.Н. Кожушко. Фотометрическую диагностику проводили портативным N-тестером (модель ПРАК 431155.022, производитель ООО «Агротестер», Россия). Содержание CO₂ определяли портативным газоанализатором CI-340 («CI-340 Hand-held Photosynthesis System», производитель CID Bio-Science, США). Статистическую обработку данных выполнили с использованием программы Statistica 10.0. По результатам проведенных исследований авторами отмечена схожая динамика снижения общей оводненности и интенсивности транспирации для исследуемых растений в конце периода вегетации. Установлено увеличение водного дефицита растений зерновых культур в фазе молочной спелости и его достоверное снижение в биомассе яровой пшеницы мягкой и ячменя на вариантах с применением биоудобрения по сравнению с контрольными вариантами. Максимальное значение коэффициента парной корреляции выявлено между параметрами содержания диоксида углерода и интенсивностью транспирации у мягкой пшеницы и ячменя. В отношении азота в листьях обнаружено относительное постоянство показателей у образцов с применением биоудобрения. В противоположность им, у контрольных образцов наблюдалась вариативность данного признака. Отмечается положительное влияние биоудобрений на параметры водного режима объектов исследования, а также интенсификация фотосинтетической активности при использовании данного мелиоранта, что способствовало увеличению урожайности изучаемых зерновых культур – у ячменя на 147,1 %, у пшеницы мягкой на 105,7 %.

Ключевые слова: пшеница мягкая яровая, пшеница твердая яровая, ячмень яровой, водный режим, фотосинтез, биоудобрение.

Для цитирования: Федорова Д. Г., Галактионова Л. В. Влияние биоудобрения на водный режим, интенсивность фотосинтеза и урожайность зерновых культур в условиях Степного Предуралья // Зерновое хозяйство России. 2025. Т. 17, № 1. С. 89–97. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-96-1-89-97.



THE EFFECT OF BIOFERTILIZER ON WATER REGIME, INTENSITY OF PHOTOSYNTHESIS AND PRODUCTIVITY OF GRAIN CROPS IN THE STEPPE PRE-URALS

D. G. Fedorova, Candidate of Biological Sciences, head of the botanic garden, senior researcher of the scientific and educational center “Biological systems and nanotechnologies”, DaryaOrlova24@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0002-5323-4965;
L. V. Galaktionova, Candidate of Biological Sciences, head of the department of biology and soil study, ORCID ID: 0000-0003-0781-3752
FSBEI HE “Orenburg State University”,
460018, Orenburg, Pobeda Av., 13

Grain crops are of great food value, productivity of which largely depends on the water regime and assimilation activity of plants. The purpose of the current study was to determine the effect of biofertilizer on the parameters of the water regime, pigment, and gas composition of grain crops. The study was conducted at the stationary research site of the Botanical Garden of Orenburg State University in 2021–2023. The objects of the research were the spring barley variety Anna, the spring common wheat variety Orenburgskaya Yubileinaya and the spring durum wheat variety Orenburgskaya. The experiment was carried out using biofertilizer containing fermented food residues and crushed plant waste with *B. Subtilis* bacteria immobilized on their surface. The water regime parameters were studied according to the method of N.N. Kozhushko. Photometric diagnostics was carried out using a portable N-tester device (model PRAK 431155.022, manufactured by Agrotester LLC, Russia). The CO₂ content was measured with a portable gas analyzer CI-340 (“CI-340 Hand-held Photosynthesis System”, manufactured by CID Bio-Science, USA). Statistical data processing was performed using the program Statistica 10.0. Based on the study results of the studies, there

was found similar dynamics of the decrease in total water content and transpiration intensity for the studied plants at the end of the vegetation period. There has been established a water deficit increase of grain crops in milk stage and its reliable decrease in the biomass of spring common wheat and barley when using biofertilizers in comparison with the control variants. The maximum value of the pair correlation coefficient was established between the parameters of carbon dioxide content and transpiration intensity in common wheat and barley. As for nitrogen in leaves, there has been found a relative constancy of the indices in the samples when using biofertilizer. In contrast, the control samples have shown variability of this trait. There has been identified a positive effect of biofertilizers on the parameters of the water regime of the grain crops, as well as the intensification of photosynthetic activity when using this ameliorant, which improved productivity of the studied grain crops by 147.1 % for barley, and by 105.7 % for common wheat.

Keywords: *spring common wheat, spring durum wheat, spring barley, water regime, photosynthesis, biofertilizer.*

Введение. Зерновые культуры имеют важное продовольственное значение, при возделывании им необходимо создавать оптимальные условия для их роста и развития. Как основной продукт питания, пшеница и ячмень являются одними из важнейших зерновых культур в мире в связи с повсеместным их использованием (Lin et al., 2018).

Урожайность зерна в значительной степени зависит от ассимиляционной активности листьев. При этом содержание хлорофилла, способного поглощать, переносить и преобразовывать световую энергию, является важным физиологическим показателем сельскохозяйственных культур и оказывает непосредственное влияние на напряженность фотосинтеза (Noor et al., 2022). Урожайность зависит от площади зеленых листьев, содержания хлорофилла и скорости и интенсивности фотосинтеза. Таким образом, в полевых условиях увеличение объема урожая связано со способностью растений улавливать солнечное излучение и преобразовывать его в биомассу (Tambussi et al., 2021).

Отсутствие комплекса приемов по воспроизводству почвы снижает способность растений поглощать световое излучение, что отрицательно влияет на эффективность использования фоторесурсов. В то же время параметры хлорофилла являются показателем, отражающим интенсивность фотосинтеза (Janeeshma et al., 2022).

Пшеница – основная зерновая культура, выращиваемая во всем мире, и всего ежегодно собирают более 600 млн т зерна. Это основной продукт питания, обеспечивающий незаменимые аминокислоты, минералы и витамины, а также полезные фитохимические вещества и пищевые волокна в рационе человека (Zhu et al., 2020). Ячмень занимает четвертое место (после пшеницы, риса и кукурузы) по посевам в мировом земледелии. Это ценное фуражное зерно, также из него производят солодовые крупы и лечебные экстракты.

Опасения в отношении продовольственной безопасности, то есть достаточного производства и доступности таких культур, как пшеница и ячмень, возрастают по мере глобального изменения климатических условий и увеличения численности населения (Zhu et al., 2020). Экстремальные климатические явления отражаются на изменении урожайности растений, тем самым являясь непосредственной угрозой для мирового растениеводства. Одним из таких

неблагоприятных погодных явлений, оказывающих лимитирующее воздействие на сельскохозяйственные культуры, является засуха (Lesk et al., 2016; Matiu et al., 2017; Sugiura et al., 2024; Kumar and Sindhu, 2024). В условиях глобального потепления климата частота и продолжительность экстремальных засух увеличиваются быстрее, чем прогнозировалось ранее. Согласно статистике, мировые потери зерновых культур были вызваны засухой и экстремальной жарой с 1964 по 2007 год (Lesk et al., 2016).

Стресс от засухи нарушает клеточный гомеостаз и в целом вызывает ряд морфологических, физиологических и биохимических изменений во всех органах растения (Michaletti et al., 2018), особенно влияя на фотосинтез листьев и транспорт углеводов (Deng et al., 2018). При стрессе от засухи растения обычно закрывают устьица, уменьшая потерю воды при испарении и снижая проводимость углекислого газа устьицами (CO_2). При этом снижается фотосинтетическая ассимиляция углерода, что впоследствии приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур (Zhu et al., 2020).

Кроме того, ремобилизация фотоассимилянтов, накопленных до наступления фазы цветения, из фотосинтетических органов зерновых культур усиливается из-за дефицита воды на стадии колошения, что увеличивает скорость налива зерна, ускоряет старение растений и в конечном итоге приводит к снижению количества и массы зерен (Deng et al., 2018).

При изучении фотосинтеза в литературе отмечается видоспецифичность показателя и его зависимость от внешних факторов среды. Наиболее традиционными показателями интенсивности фотосинтеза являются содержание и продуцирование диоксида углерода, а также содержание азота в листьях. Эта связь обусловлена тем, что большая часть азота листовой пластинки задействована в структуре хлорофилла и биохимических циклах, обеспечивающих продукционный процесс (Duan et al., 2024; Thenppan et al., 2024).

Рост и развитие сельскохозяйственных культур в значительной степени зависят от азота (N_2), важнейшего неорганического питательного вещества для синтеза аминокислот, хлорофилла, нуклеотидов, множества других метаболитов и клеточных компонентов. В сельскохозяйственном производстве доступность азота является ключевым фактором, определяющим урожайность культурных растений, поскольку он играет решающую роль в фо-

тосинтезе. Имеются данные, что способность фотосинтетических органов к фотосинтезу тесно коррелирует с их N-статусом (Zhu et al., 2020). В процессе усвоения N_2 приблизительно 60–80 % азота листьев расходуется на синтез фотосинтетического аппарата, в частности на фермент RuBisCO и световыделяющих комплексов, которые поддерживают светозависимое использование CO_2 , воды и неорганического азота для производства основных строительных блоков, накопления ряда веществ, таких как сахара, органических кислоты и аминокислоты (Makino and Osmond, 1991).

Урожайность сельскохозяйственных культур также тесно связана с чистой фотосинтетической ассимиляцией CO_2 . При этом установлено, что приблизительно 90 % сухого веса растения образуется за счет фотосинтетической ассимиляции углерода. Поэтому использование азотистых удобрений в сельском хозяйстве стало крупным достижением в удовлетворении растущих потребностей в продовольствии за счет увеличения производства и урожайности растений в мире, особенно в развивающихся странах. По статистике, производство зерна увеличилось на более чем 40 и 55 % соответственно в развитых и развивающихся странах.

Оренбургская область относится к числу регионов – важнейших сельхозтоваропроизводителей России. По посевам зерновых культур область занимает 5-е место в стране. При этом она относится к степной зоне с недостаточным атмосферным увлажнением и засушливым летом. Этот регион страдает от засухи как из-за недостаточного количества осадков, так и из-за увеличения частоты засух, вызванных аридизацией климата (Zhu et al., 2020). Для достижения высоких урожаев и экономических выгод в таких климатических условиях требуется глубокое понимание изменений в росте сельскохозяйственных растений, вызванных внесением удобрений в условиях дефицита воды.

Целью исследования являлось определение влияния биоудобрения на параметры водного режима, пигментного аппарата, газового состава листьев и урожайность растений ярового ячменя, твердой и мягкой яровой пшеницы.

Материалы и методы исследований. Исследования проведены в период 2021–2023 гг. на базе стационарного научного полигона ботанического сада Оренбургского государственного университета. Объекты исследования – сорт ярового ячменя Анна, сорт пшеницы мягкой яровой Оренбургская юбилейная и сорт пшеницы твердой яровой Оренбургская.

Были определены пробные площадки (варианты опыта): 1 и 2 – О (образцы с внесением биоудобрения); 3 и 4 – К (контрольные образцы, без внесения биоудобрения), которые располагались на отдельных делянках размером 5×5 м.

При проведении эксперимента использовали биоудобрение, полученное путем ферментирования пищевых отходов с последующим обогащением отходами растениеводства

(шелуха риса, измельченные сено и солома) с предварительно иммобилизованными на их поверхности бактериями *B. subtilis* в концентрации не менее 10^9 КОЕ/г. Пищевые отходы представляли собой предварительно высушенные и измельченные остатки овощей (капуста, морковь и др.) (Патент №2824464). Удобрение вносили путем поверхностного разбрасывания и последующей осенней вспашкой на глубину пахотного слоя с вариантами опыта (доза 20 т/га).

Почва участка исследования представлена черноземом обыкновенным карбонатным среднегумусным среднесильно тяжелосуглинистым на пермских карбонатных глинах (по Классификации почв СССР 1977 г.) или черноземом сегрегационным (по Классификация почв 2004 г.). Перед посевом почва была вспахана и боронована. Посев зерновых культур проводили ручной однорядной сеялкой в прогретую до необходимой температуры (18–20 °С) почву. Заделку семян осуществляли на стандартную глубину – 5–7 см во 2-й декаде мая.

Физиологически активные образцы листьев (3-й или 4-й сверху) с каждого участка были сорваны случайным образом для определения необходимых параметров. Сбор образцов листьев растений осуществляли в фазу колошения, налива и молочной спелости зерна. С каждой пробной площадки собирали по 50 листьев.

Погодные условия в период исследования характеризовались максимальной нестабильностью, что подтверждается значениями ГТК по сезонам вегетации – от 0,3 до 0,8, то есть климатические условия варьировали от характерных для очень сухой зоны до недостаточного увлажнения (рис. 1).

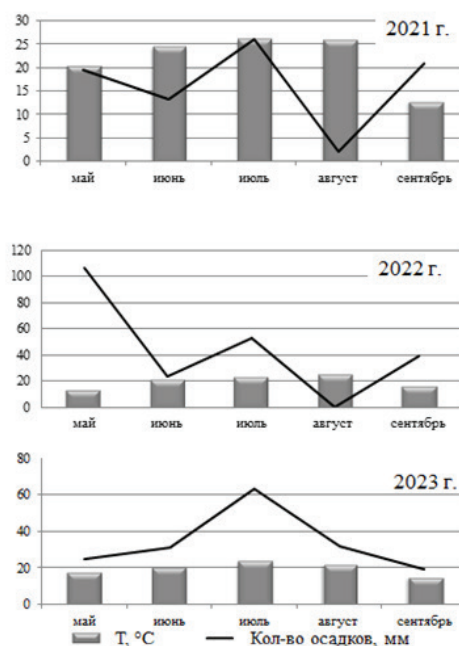


Рис. 1. Температурный режим и количество осадков по годам исследования

Fig. 1. Temperature regime and amount of precipitation during the years of study

Параметры водного режима исследовали согласно методике Н.Н. Кожушко (Кожушко, 1988).

Фотометрическую диагностику проводили портативным прибором N-тестер (производитель ООО «Агротестер», Россия), который показывает содержание азота (в ед.) в хлорофилле растений. Содержание CO_2 определяли портативным газоанализатором CI-340 (производитель CID Bio-Science, США).

Статистическую обработку данных выполняли с использованием программы Statistica 10.0.

Результаты и их обсуждение. Результаты исследования показали лабильность климатических показателей, что выразилось в нестабильности растительных параметров по годам исследования, поэтому в работе приведены усредненные за весь период наблюдений данные.

В оптимальных условиях произрастания водный режим растений поддерживается

за счет уравнивания между процессами транспирации (испарение листьями) и водопоглощения корнями. При дисбалансе данных процессов у растений наблюдается водный дефицит, чаще всего спровоцированный засушливыми условиями. В таких условиях наблюдается активизация защитных механизмов в растительном организме: уменьшается диаметр устьичной щели и повышается водоудерживающая способность.

Анализ показателей водного дефицита (ВД) выявил разницу по этому параметру среди исследуемых объектов (табл. 1). У растений мягкой пшеницы прослеживалось увеличение водного дефицита на фоне снижения оводненности листьев. При этом у растений на вариантах с применением удобрений этот показатель значительно меньше, чем на контрольных вариантах, что установлено для всех изученных фаз вегетации.

Таблица 1. Показатели водного режима зерновых культур по фазам вегетации (среднее за 2021–2023 гг.)

Table 1. Water regime of grain crops according to vegetation periods (mean in 2021–2023)

Показатель водного режима	Вариант опыта	Фаза вегетационного развития		
		Колошение	Цветение	Молочая спелость
Пшеница мягкая				
ОВ, %	О	81,0±3,6	75,1±5,8	65,2±3,0
	К	73,4±4,0	69,4±7,2	50,8±5,8
ВД, %	О	7,4±0,8	8,5±1,0	10,7±1,0
	К	10,5±2,1	12,6±1,5	20,8±3,0
ВС, %	О	43,4±3,0	58,0±7,2	49,2±3,0
	К	35,7±5,4	30,0±4,1	33,4±7,2
ИТ, г/м²*ч	О	49,7±1,5	43,7±2,2	39,4±2,4
	К	59,3±10,3	49,3±13,3	51,3±9,7
Пшеница твердая				
ОВ, %	О	75,4±3,2	70,1±2,0	50,3±2,0
	К	70,2±7,8	65,7±10,0	44,8±3,0
ВД, %	О	10,0±2,0	11,3±2,0	16,8±1,2
	К	11,2±0,9	14,8±1,0	17,1±1,0
ВС, %	О	35,8±3,0	42,0±7,0	25,4±3,0
	К	34,4±0,7	41,0±4,3	26,8±2,0
ИТ, г/м²*ч	О	35,1±2,0	30,2±1,5	31,3±3,0
	К	39,4±1,5	32,1±7,4	35,8±2,6
Ячмень				
ОВ, %	О	84,7±3,1	71,5±2,2	70,8±5,0
	К	80,4±4,5	70,2±2,4	68,9±6,4
ВД, %	О	5,2±0,8	12,3±1,0	20,1±3,3
	К	10,4±1,7	12,8±1,1	25,2±2,5
ВС, %	О	47,8±4,1	34,6±0,9	21,3±1,5
	К	40,3±3,4	33,4±1,5	18,4±0,9
ИТ, г/м²*ч	О	43,1±6,6	45,7±0,7	39,1±5,2
	К	44,5±3,5	46,4±3,5	40,3±6,7

Примечание. ОВ – общая оводненность, ВД – водный дефицит, ВС – водоудерживающая способность, ИТ – интенсивность транспирации, О – образцы с внесением мелиоранта, К – контрольные образцы, без внесения мелиоранта.

Водоудерживающая способность также повышалась у образцов пшеницы мягкой на удобренных площадках, и в фазу цветения данный показатель практически в два раза превышал контроль и составлял 58 %. Интенсивность транспирации у данной культуры закономерно

снижалась при возрастании ВД. На вариантах с внесением биоудобрения наблюдалось снижение интенсивности транспирации к концу периода вегетации, а на контрольных вариантах в фазу молочной спелости отмечено увеличение данного параметра, что влечет за собой

снижение (на 20 %) оводненности листьев с высокой корреляционной зависимостью ($r = 0,86$, при $p < 0,05$) между этими показателями.

Максимальный дефицит воды у растений твердой пшеницы наблюдался в фазу молочной спелости у образцов на контроле. По показателю общей оводненности у образцов на удобренных площадках во все фазы вегетации наблюдалось незначительное превышение значений контрольных вариантов – на 4,4–5,5 %. На значение остальных показателей водного режима внесение биоудобрения не имело статистически достоверного влияния.

Анализ содержания воды в листьях растений ячменя показал, что при использовании биоудобрения этот параметр изменялся в интервале от 84,7 до 70,8 % по фазам вегетации, при этом чем взрослее растение, тем больше его снижение. У образцов на контрольных вариантах отмечена схожая тенденция, но значения общей оводненности ниже, и варьировали в пределах от 68,9 до 80,4 %. Показатель водного дефицита на удобренных вариантах показал значения, превышающие значения контрольных вариантов с разницей более 5 % в фазе колошения и молочной спелости. Наибольшая разница водоудерживающей способности у ячменя также наблюдалась в фазу колошения и составляла 7,5 %. Интенсивность транспирации не имела значимых отличий по вариантам опыта.

Анализ полученных данных по интенсивности транспирации выявил у всех объектов исследования снижение показателя в фазу цветения, однако при внесении биоудобрения показатели оказались ниже, что мы связыва-

ем с большей адаптацией опытных растений к условиям стресса в данную фенологическую фазу. При нехватке воды в почве увеличивались водоудерживающая способность и, соответственно, содержание связанной воды с осмотическими соединениями, накапливающимися в клетках. Согласно мнению авторов, у сортов с более высокой степенью устойчивости по мере увеличения засухи усиливается способность удерживать воду в клетках растений (Makino and Osmond, 1991). При этом у образцов пшеницы мягкой и ячменя на удобренных вариантах значения водоудерживающей способности (BC) значительно увеличивались по сравнению с контролем, а максимальная разница достигала 28 % у пшеницы и 7 % у ячменя. У твердой пшеницы отличия были незначительны.

Повышение в допустимых пределах содержания диоксида углерода в растении свидетельствует об увеличении скорости фотосинтеза. В свою очередь, скорость фотосинтеза и зависимое от нее перераспределение фотосинтатов, накопленных в различных тканях растения в течение дня и/или во время вегетативного роста, имеют решающее значение для развития зерна, а затем и для его налива.

Показатель содержания углекислого газа в образцах листьев яровой пшеницы мягкой на вариантах с применением мелиоранта варьировал в течение периода вегетации от 244,82 до 303,13 ммоль/моль с минимальным значением (244,82 ммоль/моль) в фазе цветения (рис. 2).

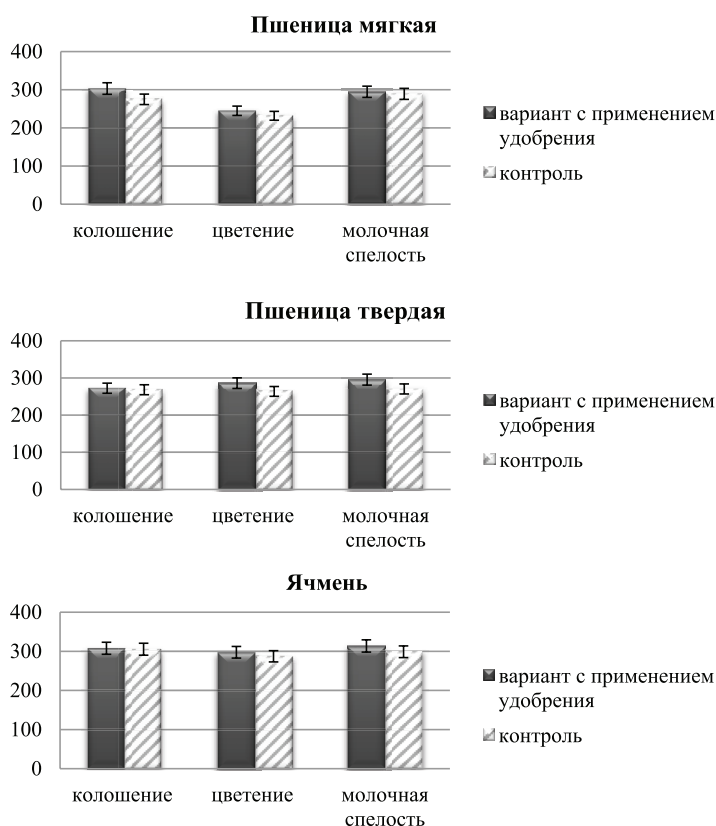


Рис. 2. Концентрация диоксида углерода в листьях растений, ммоль/моль (среднее за 2021–2023 гг.)

Fig. 2. Carbon dioxide concentration in plant leaves, mmol/mol (mean in 2021–2023)

Аналогичная сезонная динамика была отмечена и для ярового ячменя. При этом в фазу колошения отличия по вариантам опыта были недостоверны, а в фазы цветения и молочной спелости разница между вариантами опыта составляла от 10 до 15 ммоль/моль. За весь период исследований концентрация двуокиси углерода в образцах растений в фазе цветения снижалась относительно аналогичных показателей в фазы колошения и молочной спелости у растений пшеницы мягкой и ячменя обоих вариантов опыта, а также у растений пшеницы твердой на контрольном варианте. Содержание углекислого газа в листьях пшеницы твердой на удобренных вариантах характеризовалось устойчивым ростом в течение периода вегетации от 272,4 до 295,5 ммоль/моль.

При установленных колебаниях водного режима и концентраций диоксида углерода в наших опытах было отмечено относительное постоянство содержания азота у растений на удобренных вариантах по показаниям N-тестера (табл. 2). При этом вариативность значений в большей степени отмечена у растений контрольных вариантов, на что указывает коэффициент вариации, рассчитанный для периода исследования. Так, растения пшеницы твердой показывают на контроле наибольший данный коэффициент – 25 %. У остальных объектов опыта этот показатель хотя и меньше, но вдвое превышает значения образцов, выращенных при использовании биоудобрения. При этом показатели вариативности на вариантах с внесением биоудобрения оказались незначительными и не превышали 10 %.

Таблица 2. Содержание азота в листьях (по результатам определения N-тестером), среднее за 2021–2023 гг.

Table 2. Nitrogen content in leaves (measured by the N-tester), mean in 2021–2023

Объект исследований	Вариант опыта	Фаза вегетационного развития						Коэффициент вариации, %
		Колошение, ед.	НСР ₀₅	Цветение, ед.	НСР ₀₅	Молочная спелость, ед.	НСР ₀₅	
Пшеница мягкая	К	536,0±25,1	7,9	515,0±13,1	3,4	543,3±22,4	18,1	13,4
	О	605,4±15,8		598,4±13,1		595,2±10,2		5,7
Пшеница твердая	К	545,3±9,3	5,5	500,3±10,4	25,4	510,2±8,0	15,3	25,0
	О	540,3±17,8		539,4±10,5		534,3±7,8		9,2
Ячмень	К	603,2±22,4	8,7	615,4±23,4	10,6	625,3±9,8	5,6	15,6
	О	630,3±13,2		631,2±15,8		635,7±19,1		8,2

Примечание. К – контрольные образцы без внесения мелиоранта; О – образцы с внесением мелиоранта.

Максимальное значение коэффициентов парной корреляции было установлено между параметрами содержания CO₂ в листьях и интенсивностью транспирации у пшеницы мягкой ($r = 0,91$ при $p < 0,05$) и ячменя ($r = 0,89$ при $p < 0,05$) (табл. 3). При анализе параметров водного режима установлена достоверная зависимость у растений изучаемых сельскохозяйственных культур между показателями общей оводненности и водного дефицита при доста-

точно высоких коэффициентах корреляции – от 0,86 до 0,95. Взаимозависимость установлена и между водоудерживающей способностью и интенсивностью транспирации, при этом максимум отмечен для образцов пшеницы мягкой ($r = 0,88$, при $p < 0,05$). Обратной статистической зависимостью связаны параметры водоудерживающей способности и водного дефицита (при $r =$ от -0,71 до -0,80, при $p < 0,05$).

Таблица 3. Коэффициенты корреляции показателей водного режима растений на вариантах с применением биоудобрения (среднее за 2021–2023 гг.)

Table 3. Correlation coefficients of plant water regime in variants with the use of biofertilizer (mean in 2021–2023)

Показатели водного режима	ОВ	ВД	ВС	ИТ	CO ₂
Пшеница мягкая					
ОВ	1				
ВД	0,95	1			
ВС	0,35	-0,71	1		
ИТ	0,47	0,69	0,88	1	
CO ₂	0,35	0,005	0,17	0,91	1
Пшеница твердая					
ОВ	1				
ВД	0,86	1			
ВС	0,15	-0,75	1		
ИТ	0,22	0,02	0,79	1	
CO ₂	0,44	0,03	0,004	0,52	1
Ячмень					
ОВ	1				
ВД	0,91	1			
ВС	0,05	-0,80	1		
ИТ	0,33	0,19	0,80	1	
CO ₂	0,27	0,01	0,22	0,89	1

При использовании исследуемого мелиоранта отмечено увеличение урожайности по сравнению с контрольными вариантами (табл. 4). Максимальные различия характерны

для ячменя ярового, где урожайность растений под действием биоудобрения в 2,4 раза превышает показатели контроля.

Таблица 4. Показатели урожайности исследуемых культур (среднее за 2021–2023 гг.)
Table 4. Productivity indicators of the studied crops (mean in 2021–2023)

Культура	Количество зерен в колосе, шт.	Длина колоса, см	Вес 1000 семян, г	Урожайность, ц/га	НСР ₀₅
Пшеница мягкая (с применением биоудобрения)	32,7±1,3	4,39±0,12	32,36±1,6	42,07±5,54	11,7
Пшеница мягкая (контроль)	29,27±2,8	3,92±0,3	25,95±3,3	20,65±2,4	
Пшеница твердая (с применением биоудобрения)	32,16±1,3	3,93±0,1	45,3±0,9	47,7±3,8	3,1
Пшеница твердая (контроль)	30,2±1,9	3,9±0,2	44,2±0,4	44,0±12,5	
Ячмень (с применением биоудобрения)	14,26±0,5	5,52±0,2	44,5±0,7	41,6±3,4	14,8
Ячмень (контроль)	15,1±0,5	5,8±0,2	50,6±0,8	17,1±3,1	

Рассчитав статистический критерий Стьюдента (распределение нормальное по критерию Шапиро–Уилка, выборка однородная) нами получены значения: для пшеницы твердой $p = 0,07$, для пшеницы мягкой $p = 0,004$, для ячменя $p = 0,003$. Это позволяет констатировать, что для культуры ячменя и пшеницы мягкой характерна статистически достоверная зависимость урожайности от используемого в опыте биоудобрения, у пшеницы твердой этой зависимости не обнаружено.

Выводы. Анализ полученных результатов выявил схожую для культур пшеницы и ячменя динамику снижения оводненности листьев, а также индекса транспирации к концу периода вегетации.

В ходе исследования отмечено увеличение водного дефицита растений зерновых культур в фазе молочной спелости и его достоверное снижение в биомассе яровой пшеницы мягкой и ячменя на вариантах с внесением мелиоранта по сравнению с контрольными вариантами.

Об увеличении интенсивности процесса фотосинтеза под влиянием внесения биоудобрения свидетельствует рост показателей со-

держания углекислоты в растениях яровой пшеницы твердой и ячменя в фазы цветения и молочной спелости.

Показатели содержания азота в хлорофилле зерновых культур показывают относительное постоянство в показателях на протяжении всего периода вегетации на вариантах с применением мелиоранта.

Таким образом, нами установлено, что внесение исследуемого биоудобрения снижает водный дефицит растений и способствует интенсификации процессов фотосинтеза, что в конечном итоге оказывает положительный эффект и повышает урожайность зерновых культур. Увеличение урожайности при использовании мелиоративного приема по сравнению с контролем в результате полевого опыта составило у ячменя 147,1 %, у пшеницы мягкой – 105,7 %. У пшеницы твердой разница опыта от контроля равна 8 %, однако зависимость этого показателя от используемого биоудобрения у данной культуры недостоверна.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-10079.

Библиографический список

1. Кожушко Н. Н. Оценка засухоустойчивости полевых культур. Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям (методическое руководство) / под ред. Г. В. Удовенко. Л., 1988. ВИР. 49 с.
2. Патент № 2824464 С1 Российская Федерация, МПК C05F 11/08, C05F 9/04. Биоорганическое удобрение: № 2023133113: заявл. 14.12.2023: опубл. 08.08.2024 / Л. В. Галактионова, Н. А. Терехова, Д. Г. Федорова и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет».
3. Deng X., Liu Y., Xu X. X., Liu D. M., Zhu G. R., Yan X., Wang Z. M., Yan Y. M. Deng X. et al. Comparative proteome analysis of wheat flag leaves and developing grains under water deficit // *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9, Article number: 425. DOI: 10.3389/fpls.2018.00425
4. Duan W., Wang S., Zhang H., Xie B., Zhang L. Plant growth and nitrate absorption and assimilation of two sweet potato cultivars with different N tolerances in response to nitrate supply // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14(1), Article number: 21286. DOI: 10.1038/s41598-024-72422-y
5. Janeeshma E., Johnson R., Amritha M. S., Noble L., Aswathi K. P. R., Telesiński A., Kalaji H. M., Auriga A., Puthur J. T. Modulations in Chlorophyll a Fluorescence Based on Intensity and Spectral Variations of Light // *Journal of Experimental Botany*. 2022. Vol. 23(10), Article number: 5599. DOI: 10.3390/jjms23105599
6. Kumar S., Sindhu S. S. Drought stress mitigation through bioengineering of microbes and crop varieties for sustainable agriculture and food security // *Current Research in Microbial Sciences*. 2024. Vol. 10(7), Article number: 100285. DOI: 10.1016/j.crmicr.2024.100285

7. Lesk C., Rowhani P., Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production // *Nature*. 2016. Vol. 529, Article number: 7584. P. 84–87. DOI: 10.1038/nature16467.
8. Lin W., Guo X., Pan X., Li Z. Chlorophyll composition, chlorophyll fluorescence, and grain yield change in esl mutant rice // *International Journal of Molecular Sciences*. 2018. Vol. 19(10), Article number: 2945.
9. Makino A., Osmond B. Solubilization of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase from the membrane fraction of pea leaves // *Photosynthesis research*. 1991. Vol. 29, P. 79–85. DOI: 10.1007/BF00035378
10. Matiu M., Ankerst D. P., Menzel A. Interactions between temperature and drought in global and regional crop yield variability during 1961-2014 // *PloS one*. 2017. Vol. 12(5), Article number: e0178339. DOI: 10.1371/journal.pone.0178339
11. Michaletti A., Naghavi M. R., Toorchi M., Zolla L., Rinalducci S., Michaletti A. et al. Metabolomics and proteomics reveal drought-stress responses of leaf tissues from spring-wheat // *Scientific reports*. 2018. Vol. 8(1), Article number: 5710. DOI: 10.1038/s41598-018-24012-y
12. Noor H., Sun M., Algwaiz H. I. M. et al. Chlorophyll fluorescence and grain filling characteristic of wheat (*Triticum aestivum* L.) in response to nitrogen application level // *Molecular Biology Reports*. 2022. Vol. 49(7). P. 7157–7172. DOI: 10.1007/s11033-022-07612-w
13. Sugiura D., Mitsuya S., Takahashi H., Yamamoto R., Miyazawa Y. Microcontroller-based water control system for evaluating crop water use characteristics // *Plant Methods*. 2024. Vol. 20(1), Article number: 179. DOI: 10.1186/s13007-024-01305-0
14. Tambussi E. A., Maydup M. L., Carrión C. A., Guiamet J. J., Araus J. L. Ear photosynthesis in C3 cereals and its contribution to grain yield: methodologies, controversies, and perspectives // *Journal of Experimental Botany*. 2021. Vol. 72(11), P. 3956–3970. DOI: 10.1093/jxb/erab125
15. Thenappan D. P., Pandey R., Hada A., Jaiswal D. K., Chinnusamy V., Bhattacharya R., Annapurna K. Physiological Basis of Plant Growth Promotion in Rice by Rhizosphere and Endosphere Associated *Streptomyces* Isolates from India // *Rice (N Y)*. 2024. Vol. 17(1), Article number: 60. DOI: 10.1186/s12284-024-00732-w
16. Zhu D., Zhu G., Zhang Z., Wang Z., Yan X., Yan Y., Zhu D. et al. Effects of independent and combined water-deficit and high-nitrogen treatments on flag leaf proteomes during wheat grain development // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21(6), Article number: 2098. DOI: 10.3390/ijms21062098

References

1. Kozhushko N. N. Otsenka zasukhoustoichivosti polevykh kul'tur [Estimation of drought resistance of field crops. Diagnostics of plant resistance to stress effects (methodological guide)]. Diagnostika ustoichivosti rastenii k stressovym vozdeistviyam (metodicheskoe rukovodstvo) / pod red. G. V. Udovenko. L., 1988. VIR. 49 s.
2. Patent № 2824464 C1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK C05F 11/08, C05F 9/04. Bioorganicheskoe udobrenie [Patent No. 2824464 C1 Russian Federation, IPC C05F 11/08, C05F 9/04. Bioorganic fertilizer]: № 2023133113: yayavl. 14.12.2023: opubl. 08.08.2024 / L. V. Galaktionova, N. A. Terekhova, D. G. Fedorova i dr.; yayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Orenburgskii gosudarstvennyi universitet».
3. Deng X., Liu Y., Xu X. X., Liu D. M., Zhu G. R., Yan X., Wang Z. M., Yan Y. M. Deng X. et al. Comparative proteome analysis of wheat flag leaves and developing grains under water deficit // *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9, Article number: 425. DOI: 10.3389/fpls.2018.00425
4. Duan W., Wang S., Zhang H., Xie B., Zhang L. Plant growth and nitrate absorption and assimilation of two sweet potato cultivars with different N tolerances in response to nitrate supply // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14(1), Article number: 21286. DOI: 10.1038/s41598-024-72422-y
5. Janeeshma E., Johnson R., Amritha M. S., Noble L., Aswathi K. P. R., Telesiński A., Kalaji H. M., Auriga A., Puthur J. T. Modulations in Chlorophyll a Fluorescence Based on Intensity and Spectral Variations of Light // *Journal of Experimental Botany*. 2022. Vol. 23(10), Article number: 5599. DOI: 10.3390/ijms23105599
6. Kumar S., Sindhu S. S. Drought stress mitigation through bioengineering of microbes and crop varieties for sustainable agriculture and food security // *Current Research in Microbial Sciences*. 2024. Vol. 10(7), Article number: 100285. DOI: 10.1016/j.crmicr.2024.100285
7. Lesk C., Rowhani P., Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production // *Nature*. 2016. Vol. 529, Article number: 7584. P. 84–87. DOI: 10.1038/nature16467.
8. Lin W., Guo X., Pan X., Li Z. Chlorophyll composition, chlorophyll fluorescence, and grain yield change in esl mutant rice // *International Journal of Molecular Sciences*. 2018. Vol. 19(10), Article number: 2945.
9. Makino A., Osmond B. Solubilization of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase from the membrane fraction of pea leaves // *Photosynthesis research*. 1991. Vol. 29, P. 79–85. DOI: 10.1007/BF00035378
10. Matiu M., Ankerst D. P., Menzel A. Interactions between temperature and drought in global and regional crop yield variability during 1961-2014 // *PloS one*. 2017. Vol. 12(5), Article number: e0178339. DOI: 10.1371/journal.pone.0178339
11. Michaletti A., Naghavi M. R., Toorchi M., Zolla L., Rinalducci S., Michaletti A. et al. Metabolomics and proteomics reveal drought-stress responses of leaf tissues from spring-wheat // *Scientific reports*. 2018. Vol. 8(1), Article number: 5710. DOI: 10.1038/s41598-018-24012-y
12. Noor H., Sun M., Algwaiz H. I. M. et al. Chlorophyll fluorescence and grain filling characteristic of wheat (*Triticum aestivum* L.) in response to nitrogen application level // *Molecular Biology Reports*. 2022. Vol. 49(7), P. 7157–7172. DOI: 10.1007/s11033-022-07612-w

13. Sugiura D., Mitsuya S., Takahashi H., Yamamoto R., Miyazawa Y. Microcontroller-based water control system for evaluating crop water use characteristics // *Plant Methods*. 2024. Vol. 20(1), Article number: 179. DOI: 10.1186/s13007-024-01305-0
14. Tambussi E. A., Maydup M. L., Carrión C. A., Guiamet J. J., Araus J. L. Ear photosynthesis in C3 cereals and its contribution to grain yield: methodologies, controversies, and perspectives // *Journal of Experimental Botany*. 2021. Vol. 72(11), P. 3956–3970. DOI: 10.1093/jxb/erab125
15. Thenappan D. P., Pandey R., Hada A., Jaiswal D. K., Chinnusamy V., Bhattacharya R., Annapurna K. Physiological Basis of Plant Growth Promotion in Rice by Rhizosphere and Endosphere Associated Streptomyces Isolates from India // *Rice (N Y)*. 2024. Vol. 17(1), Article number: 60. DOI: 10.1186/s12284-024-00732-w
16. Zhu D., Zhu G., Zhang Z., Wang Z., Yan X., Yan Y., Zhu D. et al. Effects of independent and combined water-deficit and high-nitrogen treatments on flag leaf proteomes during wheat grain development // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21(6), Article number: 2098. DOI: 10.3390/ijms21062098

Поступила: 22.10.24; доработана после рецензирования: 25.12.24; принята к публикации: 27.12.24.

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. Федорова Д. Г. – концептуализация исследований, анализ литературных источников, анализ данных и их интерпретация, подготовка рукописи, финальная доработка текста, оформление сопроводительных документов; Галактионова Л. В. – непосредственное участие в проведении полевых испытаний, редакционная правка текста, финальная доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.