

АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ И ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БИОУДОБРЕНИЯ

Д. Г. Федорова, кандидат биологических наук, руководитель научной группы ботанического сада, доцент кафедры биологии и почвоведения, DaryaOrlova24@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0002-5323-4965;

Л. В. Галактионова, кандидат биологических наук, заведующая кафедрой биологии и почвоведения, ORCID ID: 0000-0003-0781-3752
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»,
460018, г. Оренбург, пр-т Победы д. 13.

В настоящее время актуальным является решение проблемы повышения продуктивности сельскохозяйственных культур. Параметры фотосинтетической деятельности играют важную роль в фотосинтезе и обеспечивают эффективное функционирование растений в различных условиях. Понимание этих процессов помогает нам лучше понять механизмы роста и развития растений, а также разрабатывать методы повышения урожайности и устойчивости к стрессовым условиям. Цель исследования – оценить влияние биоудобрений на функционирование фотосинтетического аппарата и изменчивость площади листовых пластинок сельскохозяйственных зерновых культур (твердая пшеница, ячмень яровой), а также установить зависимость урожайности от применяемого мелиоранта. Объектами исследования были выбраны ячмень яровой Анна и пшеница твердая Оренбургская. Площадь листовой пластинки измеряли методом сканирования, используя программу APFill Ink&Toner Coverage Meter. Для определения содержания хлорофилла использовали портативный прибор N-тестер. Авторами достоверно установлены положительные взаимосвязи между ростом урожайности и размером листовой пластинки исследуемых опытных растений. Внесение исследуемого биоудобрения оказало положительное влияние на увеличение хлорофилла в листовых пластинках у ячменя. Это объясняет возможность изменения исследуемых параметров агротехническими средствами (внесением удобрения). Отмечена существенная корреляционная зависимость (при $p < 0,05$) между параметрами высоты с количеством семян в колосе ($r = 0,63$) и площадью листовой пластинки ($r = 0,69$), количеством семян в колосе и урожайностью ($r = 0,86$). В результате проведенных исследований установлена зависимость некоторых количественных параметров семенного материала между собой (длина колоса – количество семян в колосе), а также положительная корреляционная зависимость отмечена у площади листьев и длины колоса ($r = 0,69$). Достоверно получена значимая зависимость урожайности ячменя от используемого мелиоранта. При этом увеличение урожайности при применении удобрения по сравнению с контролем в результате полевого опыта составило 58,9 %.

Ключевые слова: пшеница твердая, ячмень яровой, хлорофилл, площадь листа, урожайность, биоудобрение.

Для цитирования: Федорова Д. Г., Галактионова Л. В.. Анализ изменчивости морфометрических и физиологических показателей зерновых культур при использовании биоудобрения // Зерновое хозяйство России. 2024. Т. 16, № 1. С. 89–96. DOI: 10.31367/2079-8725-2024-90-1-89-96.



ANALYSIS OF THE VARIABILITY OF MORPHOMETRIC AND PHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF GRAIN CROPS WHEN USING BIOFERTILIZERS

D. G. Fedorova, Candidate of Biological Sciences, head of the research group of botanic garden, associate professor of the department of biology and soil study, 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

Currently, solving the problem of improving agricultural crops' productivity is of great relevance. The parameters of photosynthetic activity play an important role in photosynthesis and ensure the efficient functioning of plants under various conditions. Understanding of these processes helps better understand the mechanisms of plant growth and development, as well as develop methods to increase productivity and resistance to stress conditions. The purpose of the current study was to estimate the effect of biofertilizers on the functioning of the photosynthetic apparatus and the variability of the area of leaf blades of agricultural grain crops (durum wheat, spring barley), and to establish the dependence of productivity on the ameliorant used. The objects of study were the spring barley variety 'Anna' and the durum wheat variety 'Orenburgskaya'. The area of the leaf blade was measured by scanning using the AP-Fill Ink&Toner Coverage Meter program. To determine the chlorophyll content, there was used a portable N-tester. There has been reliably established positive correlation between productivity increase and the size of the leaf blade of the experimental plants. The application of the studied biofertilizer has had a positive effect on chlorophyll increase in the barley leaf blades. This explains the possibility of changing the studied parameters by agricultural methods (fertilizer application). There has been found a significant correlation (at $p < 0.05$) between the height parameters with a number of seeds in a head ($r = 0.63$) and a leaf blade area ($r = 0.69$), a number of seeds in a head and productivity

($r = 0.86$). As a result of the study, there has been established a relationship between some quantitative parameters of the seed material (head length – number of seeds in a head), and a positive correlation was identified between a leaf area and a head length ($r = 0.69$). There has been obtained a significant dependence of barley productivity on the ameliorant used. At the same time, the productivity increase when using fertilizer compared to the control was 58.9 %.

Keywords: durum wheat, spring barley, chlorophyll, leaf area, productivity, biofertilizer.

Введение. Физиолого-биохимические процессы, связанные с фотосинтезом, играют важную роль в общей продуктивности и урожайности сельскохозяйственных культур. Оптимизация работы фотосинтетического аппарата может значительно повысить производительность растений – до 60 %.

Главным органом фотосинтеза является лист, который выполняет сложные оптические процессы, преобразуя солнечную энергию в химическую энергию органических веществ (Agarie et al., 1992). Вещества, полученные листьями в процессе фотосинтеза, используются для образования биомассы и поддержания метаболических процессов растения.

Оптимизация фотосинтеза может быть достигнута различными способами. Например, улучшение фотосинтетической эффективности листьев может быть получено путем изменения хлоропластов или их структуры. Также оптимальное освещение и температура окружающей среды могут существенно повысить производительность фотосинтетического процесса. Но помимо оптимизации фотосинтеза, важно обеспечить достаточное поступление питательных веществ и воды к растениям. Недостаток питательных веществ или нарушение водного баланса может существенно снизить производительность фотосинтеза и, как следствие, урожайность культур. Кроме того, современные исследования также уделяют внимание генетической модификации растений с целью увеличения их фотосинтетической эффективности. Некоторые генетические изменения позволяют растениям лучше использовать световую энергию и увеличивают производство фотосинтатов (Agarie et al., 1992). Оптимизация фотосинтеза и обеспечение растений необходимыми ресурсами играют решающую роль в повышении продуктивности и урожайности сельскохозяйственных культур.

В листьях высших растений присутствуют две формы хлорофилла – Chl a и Chl b (Resende et al., 2023). Эти формы пигмента содержат магний и являются основными компонентами фотосинтеза. Хлорофилл играет роль светособирающих комплексов, которые поглощают световую энергию и направляют ее в реакционные центры. Растения с высоким содержанием зеленого пигмента способны поглощать больше энергии, что способствует более интенсивному фотосинтезу и росту биомассы. Исследования показывают, что оптимальные уровни хлорофилла способствуют повышению урожайности и качества сельскохозяйственных культур (Колесников и др., 2014).

Еще одним из показателей, характеризующих фотосинтетическую деятельность, является площадь листовой пластинки растений.

Научно подтверждено, что площадь листьев напрямую влияет на урожайность зерна и биомассы (Сидько и др., 2017; Rahimzaden, 2017). Размеры поверхности листа – важное условие хорошей продуктивности культуры. Чем больше размер листьев, тем выше интенсивность фотосинтеза и, соответственно, выше нарастание биомассы. При меньшей площади листьев наблюдается неполное использование световой энергии и снижение накопления органического вещества. Размеры и нарастание листовой поверхности зависят от различных факторов, таких как плотность посева, фаза развития растений и условия окружающей среды (Корягин и Корягина, 2018).

Параметры фотосинтетической деятельности играют важную роль в фотосинтезе и обеспечивают эффективное функционирование растений в различных условиях. Понимание этих процессов помогает нам лучше понять механизмы роста и развития растений, а также разрабатывать методы повышения урожайности и устойчивости к стрессовым условиям.

Показатели фотосинтетической деятельности растений (площадь листьев, содержание в них пигментов) можно регулировать как подбором сортов, так и агротехническими приемами, в том числе использованием удобрений. В литературе можно встретить большое количество примеров положительного влияния различного рода удобрений на рост и развитие сельскохозяйственных растений (Сметанникова и др., 2019; Назаров и др., 2020). Экспериментально доказано, что обработка растений компостом стимулирует увеличение содержания пигментов и углеводов, а также использование азотных удобрений (аммонийный азот) повышает концентрацию хлорофилла (Новикова и др., 2014). Увеличение данного параметра в листьях наблюдается при внесении биогумуса в почву для выращивания растений (Hu et al., 2008). Аналогичные полевые исследования по применению различных видов хелатных микроудобрений, регуляторов роста растений, гуминовых препаратов и других удобрений были проведены в разных почвенно-климатических районах (Шупинская и др., 2017). Эти опыты подтвердили их эффективность при выращивании различных культур, включая зерновые, зернобобовые, масличные, овощные, плодовые и ягодные (Зволинский и др., 2019; Гузенко и др., 2021; Габбасова и др., 2018). В целом исследования в области применения удобрений продолжаются, и их результаты способствуют повышению урожайности и качества продукции, что является важным фактором для обеспечения продовольственной безопасности и устойчивого развития сельских районов.

Цель нашего исследования – оценить влияние биоудобрений на функционирование фотосинтетического аппарата и изменчивость площади листовых пластинок сельскохозяйственных зерновых культур (твердая пшеница, ячмень яровой), а также установить зависимость урожайности от применяемого мелиоранта.

Материалы и методы исследований.

Работа выполнена в рамках грантового проекта: Конкурс 2023 года «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» (региональный конкурс). Годы выполнения: 2023–2024. Наши исследо-

вания проводились в течение вегетационного периода 2023 г. на территории Ботанического сада ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет». Почвенный покров участка исследования был представлен черноземом обыкновенным среднегумусным среднемогучим тяжелосуглинистым, на котором осуществлен посев зерновых культур.

Погодные условия в период проведения исследований характеризовались максимальной нестабильностью (табл. 1). Гидротермический коэффициент за период май–август при сумме активных температур – 2557,5 °С в среднем равен 0,57, что определяет погодные условия, характерные для зон сухого земледелия.

Таблица 1. Метеоданные по г. Оренбургу (2023 г.)
(по данным Государственного учреждения «Оренбургский областной центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»)
Table 1. Weather data for the city of Orenburg (2023)
(according to the State Institution “Orenburg Regional Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring”)

		Май	Июнь	Июль	Август
Температура, °С	средн.	+17,6	+20,3	+23,7	+21,8
	max	+33,3	+35,2	+40,4	+34,3
	min	+2,4	+5,0	+9,8	+8,1
Сумма активных температур, °С		544,8	621,5	735,9	655,3
Относительная влажность воздуха, %	средн.	45	49	58	53
	min	13	16	9	15
Скорость ветра, м/с	средн.	3,7	3,6	3,0	3,0
	max	9,0	10,0	8,0	10
Осадки, мм	сумма	25,2	31	67,3	31,6
ГТК		0,46	0,49	0,86	0,48

В качестве объектов исследования были выбраны типичные зерновые культуры региона, имеющие продовольственное значение и идущие на экспорт: ячмень яровой Анна и пшеница яровая твердая Оренбургская.

Для каждой зерновой культуры были определены пробные площадки: № 1 и 2 (образцы опытные с внесением удобрений) и пробные площадки № 3 и 4 (контрольные образцы без удобрений). Пробные площадки располагались на отдельных участках размером 5×5 м. При подготовке к посеву проводили механическую вспашку и боронование почвы.

Посев зерновых культур производили ручной однорядной сеялкой в прогретую до 18–20 °С почву с заделкой семян на глубину 5–7 см во второй декаде мая с нормой высева 4,0 млн на 1 га.

При проведении эксперимента использовали удобрение, созданное на основе растительных отходов переработки сельскохозяйственной продукции, с добавлением биологически активных компонентов и содержанием органических веществ и азота не менее 75 и 4,5 % соответственно. Удобрение вносили в осенний период (2022 г.) в дозе 5 л на 1 м². Повторно в аналогичной дозировке удобрения вносили в почву весной (2023 г.).

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. С каждой пробной площадки собирали по 50 листьев.

Площадь листовой пластинки измеряли методом сканирования, используя программу APFill Ink&Toner Coverage Meter.

Для определения содержания хлорофилла в листовых пластинках пользовались N-тестер (модель ПРАК 431155.022) – это портативный прибор, использующий фотометрический метод диагностики содержания хлорофилла в листьях (рис. 1).



Рис. 1. N-тестер модель ПРАК 431155.022
Fig. 1. N-tester model PRAK 431155.022

Принцип работы прибора основывается на вычислении отношения величин поглощения светового потока в двух участках спектра: красного и ближнего инфракрасного. Показатели меняются в зависимости от количества поглощенного хлорофиллом листа светового потока. На каждой пробной площадке осуществляли до 50 измерений. Результаты определений представлены в относительных условных единицах (от 0 до 1000).

Для выявления корреляционных зависимостей после созревания зерна нами были проанализированы следующие параметры:

- длина колоса (с использованием электронного штангельциркуля ADA Mechanic 150 Pro),
- количество семян в колосе,
- вес 1000 семян (ГОСТ 12042-80),
- урожайность (ц/га) – по стандартной формуле: $(a \cdot b \cdot c) / (10\ 000)$, где a – количество коло-

сков на 1 м^2 , b – среднее количество семян в одном колосе, c – средний вес 1000 зерен.

Статистическую обработку данных проводили с применением программы Microsoft Excel и Statistica 10.0.

Результаты и их обсуждение. Мы производили вычисление среднего значения площади одного листа исследуемых зерновых культур. В опыте с применением удобрений значение признака варьировало у пшеницы в пределах $7,95\text{--}9,61\text{ см}^2$, у ячменя – $5,25\text{--}7,1\text{ см}^2$. У образцов варианта 3 и 4 пшеницы показатель контроля оказался ниже и изменялся от $7,23\text{ см}^2$ до $9,17\text{ см}^2$. У ячменя средние значения опыта и контроля по данному параметру практически одинаковы, с разницей всего в $0,02\text{ см}^2$. Однако данный признак у контроля этой культуры оказался более стабильным – коэффициент вариации равен $2,78\%$ против $25,72\%$ у опытного образца ячменя (рис. 2).

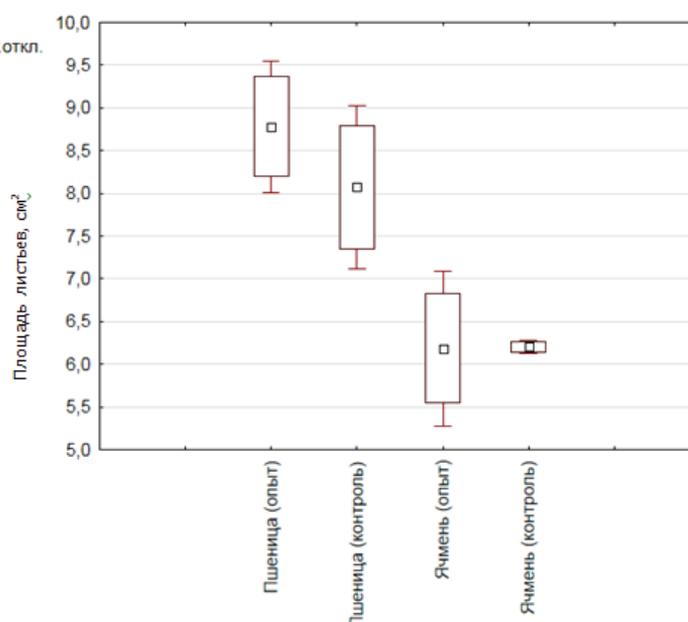


Рис. 2. Вариация площади листовых пластинок у исследуемых растений (мера измерения – см^2)
Fig. 2. Variation in leaf blades' area of the studied plants (measured in cm^2)

Анализируя влияние биоудобрения на метрические показатели листьев, используя t-тест Стьюдента (распределение нормальное по критерию Шапиро–Уилка, выборка однородная), выявлено следующее: значение площади листовой пластинки достоверно (при $p \leq 0,05$) зависит от применения исследуемого мелиоранта у пшеницы твердой – $p = 0,005$, у ячменя же такого влияния не выявлено ($p = 0,8$). Из чего следует, что тенденция увеличения площади листьев в опыте характерна для образцов с применением удобрения у исследуемого сорта ячменя.

Содержание хлорофилла на всех исследуемых площадках имеет следующую тенденцию – внесение удобрений оказало положительное влияние на синтез хлоропластов (рис. 3). Максимальное содержание зеленого пигмента у обеих культур отмечается на площад-

ке № 2 на фоне внесения удобрения: пшеница – показания N-тестера составили $615,0 \pm 48,4$ ед., ячмень – $719,8 \pm 51,4$ ед. Наибольшее отличие между вариантом опыта и контролем по исследуемому параметру отмечено у ячменя, где среднее содержание пигмента при внесении удобрения на $71,5$ ед. больше контроля. У твердой пшеницы эта разница составила 30 ед.

Проверяя гипотезу также t-тестом Стьюдента, выявлено достоверное положительное влияние применения удобрения на показатели N-тестера в сторону увеличения, а следовательно, на изменение содержания зеленого пигмента у опытных образцов ячменя ($p = 0,04$).

Проанализировав вышеописанное, можно сделать вывод, что в целом содержание хлорофилла является модификационным признаком и регулируется агротехническими приемами, в данном случае внесением биоудобрения.

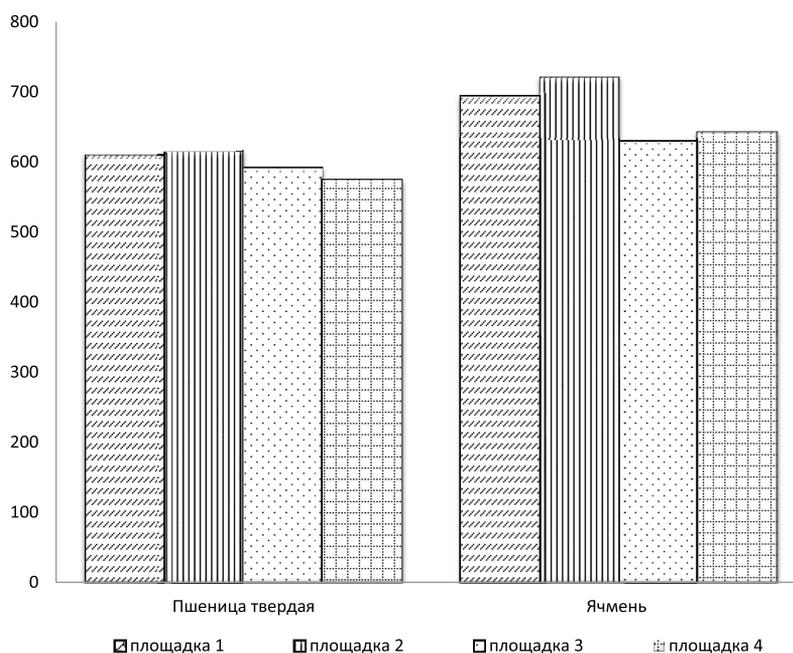


Рис. 3. Содержание хлорофилла в листьях объектов исследования
 Fig. 3. Chlorophyll content in the leaves of the studied objects

Метрические и количественные параметры, полученные нами после созревания зерна, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Качественные и количественные показатели зерновых культур
 Table 2. Qualitative and quantitative indicators of grain crops

Культура		Количество зерен в колосе	Длина колоса, см	Масса 1000 семян, г	Урожайность, т/га
Опыт с внесением удобрения	Пшеница твердая	32,16±1,3	3,93±0,1	45,3±0,9	4,8±0,4
	Ячмень	14,26±0,5	5,52±0,2	44,5±0,7	4,2±0,3
Контроль	Пшеница твердая	30,2±1,9	3,9±0,2	44,2±0,4	4,4±1,3
	Ячмень	15,1±0,5	5,8±0,2	50,6±0,8	1,7±0,3

Для определения силы взаимосвязи площади листовых пластинок с вышеперечисленными характеристиками зерновых культур (распределение нормальное по критерию Шапиро–Уилка, связь между признаками линейная) нами использована такая статистическая мера, как корреляционный анализ Пирсона, статистическая значимость принята при $p < 0,05$. Сильная зависимость установлена для параметров «количество зерен в колосе»

и «урожайность», у пшеницы эта взаимосвязь максимальна ($r = 0,86$). Показатель длины колоса также статистически достоверно коррелирует с количеством семян в колосе, а наиболее тесная связь этих показателей отмечена у ячменя ($r = 0,63$). Достоверная корреляционная зависимость обнаружена между показателями «длина колоса» и «площадь листовой пластинки», а наибольшая взаимосвязь оказалась у ячменя, где $r = 0,69$ (табл. 3, 4).

Таблица 3. Корреляционная зависимость количественных показателей пшеницы твердой
 Table 3. Correlation between quantitative indicators of durum wheat

Пшеница твердая	1	2	3	4	5
(1) Длина колоса	1	–	–	–	–
(2) Кол-во зерен в колосе	0,58	1	–	–	–
(3) Масса 1000 семян	0,54	0,36	1	–	–
(4) Урожайность	0,23	0,86	0,54	1	–
(5) Площадь листа	0,31	-0,44	-0,55	0,09	1

Таблица 4. Корреляционная зависимость количественных показателей ячменя
Table 4. Correlation between quantitative indicators of barley

Ячмень	1	2	3	4	5
(1) Длина колоса	1	–	–	–	–
(2) Кол-во зерен в колосе	0,63	1	–	–	–
(3) Масса 1000 семян	0,18	0,13	1	–	–
(4) Урожайность	0,13	–0,05	–0,09	1	–
(5) Площадь листа	0,69	–0,81	0,3	0,16	1

Таким образом, наглядно показано, как площадь листьев объектов исследования оказывает влияние на биомассу зерновых культур.

Площадь листьев прямо пропорционально связана с количеством пигментов (Юдина и др., 2017), которые в свою очередь влияют на метаболические процессы фотосинтеза, скорость и направленность биохимических процессов в тканях растений. Анализ полученных данных показал положительную взаимозависимость содержания пигмента и значений средней площади листовых пластинок. Корреляция у твердой пшеницы и ячменя составила 0,54 и 0,6 соответственно.

Выполнена сравнительная оценка средних арифметических значений урожайности экспериментальных и контрольных групп также с использованием t-теста Стьюдента (распределение нормальное по критерию Шапиро–Уилка, выборка однородная). В результате применения данного статистического критерия получено: для пшеницы $p = 0,07$, для ячменя $p = 0,003$. Это позволяет констатировать, что для культуры ячменя характерна статистически достоверная зависимость урожайности от используемого в опыте биоудобрения, у пшеницы этой зависимости не обнаружено.

Выводы.

1. В ходе проведения исследования отмечена существенная корреляционная зависимость (при $p < 0,05$) между параметрами высоты с количеством семян в колосе ($r = 0,63$) и площадью листовой пластинки ($r = 0,69$), количеством семян в колосе и урожайностью ($r = 0,86$).

2. Внесение биоудобрения в почву при выращивании зерновых культур достоверно увеличило площадь листовой поверхности у твердой пшеницы Оренбургская, а содержание в листьях хлорофилла и, соответственно, продуктивность фотосинтеза – у ячменя Анна.

3. Повышение урожайности при использовании мелиоративного приема по сравнению с контролем в результате полевого опыта составило у ячменя 58,9 %, что подтверждают статистические данные. У пшеницы разница опыта от контроля равна 8 %, однако зависимость этого показателя от используемого удобрения у данной культуры недостоверна.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-10079, <https://rscf.ru/project/23-26-10079/>.

Библиографические ссылки

1. Габбасова И.М., Сулейманов Р.Р., Гарипов Т.Т., Комиссаров М.А., Сидорова Л.В., Галимзянова Н.Ф., Liebelt P., Абакумов Е.В., Гималетдинова Г.А., Простякова З.Г. Использование местных удобрений почвенного гриба *Trichoderma koningii* Oudem. и no-till обработки для улучшения агроэкологии в Южном Предуралье // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53, № 5. С. 1004–1012.
2. Гузенко А.В., Солонкин А.В., Сапунков В.Л. Влияние макро- и микроудобрений на урожайность и качество сортов озимой пшеницы // Агробиологический вестник. 2021. № 3. С. 78–84.
3. Зволинский В.П., Полескачев Ю.Н., Калмыкова Е.В., Калмыкова О.В. Влияние макро- и микроудобрений на качество плодов томата // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 1(53). С. 32–41.
4. Колесников Л.Е., Подгорная Е.Б., Танюхина О.Н., Бурова О.И., Колесникова Ю.Р. Внутривидовая изменчивость элементного состава яровой мягкой пшеницы и ее связь с урожайностью и повреждением листьев вредителями // Биосфера. 2014. № 4. С. 359–364.
5. Корягин Ю.В., Корягина Н.В. Эколого-агрономическая оценка применения микробиологических удобрений в растениеводстве для обеспечения экологической безопасности человека // Качество жизни населения и экология. 2018. С. 110–151.
6. Назаров А.М., Гараньков И.Н., Туктарова И.О., Сальманова Э.Р., Архипова Т.Н., Иванов И.И., Феоктистова А.В., Простякова З.Г., Кудоярова Г.Р. Содержание фитогормонов и рост побегов у пшеницы (*Triticum durum* Desf.) под влиянием гуматов натрия в составе гранулированных органоминеральных удобрений // Сельскохозяйственная биология. 2020. Т. 55, № 5. С. 945–955.
7. Новикова Н.Е., Грошелев С.Н., Бобков С.В. Отзывчивость гороха на удобрения и регуляторы роста // Земледелие. 2014. № 2. С. 38–40.
8. Сидько А.Ф., Ботвич И.Ю., Письман Т.И., Шевырнов А.П. Оценка содержания хлорофилла и урожайности зерновых культур по хлорофилльному потенциалу [Электронный ресурс] // Биофизика. 2017. Т. 62, № 3. С. 565–569. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29107893&> (дата обращения: 13.11.2023)

9. Сметанникова А.Ф., Косолапова А.И., Корляков К.Н., Оносов Д.В., Фомин Д.С., Ямалтдинова В.Р., Шишков Д.Г., Оносова Д.Ф. Концепция использования комплексных удобрений пролонгированного действия на основе отходов переработки калийно-магниевых руд как новой парадигмы в улучшении плодородия почв // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. № 100. С. 133–158.

10. Шупинская И.А., Самсонова Н.Е., Антонова Н.А. Влияние корневого и фолиарного питания растений минеральными удобрениями и соединениями кремния на показатели фотосинтетической деятельности и урожайность зерна яровой пшеницы // Агрохимия. 2017. № 2. С. 11–18.

11. Юдина П.К., Иванова Л.А., Ронжина Д.А., Золотарева Н.В., Иванов Л.А. Варьирование параметров листьев и содержания пигментов у трех видов степных растений в зависимости от аридности климата // Физиология растений. 2017. № 64(3). С. 190–203. DOI: 10.7868/s0015330317020142

12. Agarie S., Agata W., Kubota F., Kaufman P.B. Physiological roles of silicon in photosynthesis and dry matter production in rice plants: I. Effects of silicon and shading treatments // Japanese journal of crop science. 1992. Vol. 61, № 2. P. 200–206. DOI: 10.1626/jcs.61.200

13. Hu Y., Burcus Z., Schmidhalter U. Effect of foliar fertilization application on the growth and mineral nutrient content of maize seedlings under drought and salinity // Soil Science and Plant Nutrition. 2008. Vol. 54, № 1. P. 133–141. DOI: 10.1111/j.1747-0765.2007.00224.x

14. Rahimzadeh S., Sohrabi Y., Pizad A., Sheykhabglou R. Effect of biological and chemical fertilization on the yield and nutrients of Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) seeds // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2017. T. 10, № 3. С. 323–332.

15. Resende A.C.R., Pereira R., Nunes C., Cruz S., Calado R., Cartaxana P. Photosynthetic pigment and carbohydrate profiling of fucus vesiculosus from an iberian coastal lagoon // Plants. 2023. Vol. 12, № 6. Article number: 1234. DOI: 10.3390/plants12061324

References

1. Gabbasova I.M., Suleimanov R.R., Garipov T.T., Komissarov M.A., Sidorova L.V., Galimzyanova N.F., Liebelt P., Abakumov E.V., Gimaletdinova G.A., Prostyakova Z.G. Ispol'zovanie mestnykh udobrenii pochvennogo griba *Trihoderma koningii* Oudem. i no-till obrabotki dlya uluchsheniya agrochernozema v Yuzhnom Predural'e [Use of local fertilizers of the soil fungus *Trihoderma koningii* Oudem. and no-till treatments to improve agrobblackearth in the Southern Urals] // Sel'skokhozyaistvennaya biologiya. 2018. T. 53, № 5. S. 1004–1012.

2. Guzenko A.V., Solonkin A.V., Sapunkov V.L. Vliyanie makro- i mikroudobrenii na urozhainost' i kachestvo sortov ozimoi pshenitsy [The effect of macro- and microfertilizers on productivity and quality of winter wheat varieties] // Agrokhimicheskii vestnik. 2021. № 3. S. 78–84.

3. Zvolinskii V.P., Poleskachev Yu.N., Kalmykova E.V., Kalmykova O.V. Vliyanie makro- i mikroudobrenii na kachestvo plodov tomata [The effect of macro- and microfertilizers on the quality of tomatoes] // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2019. № 1(53). S. 32–41.

4. Kolesnikov L.E., Podgornaya E.B., Tanyukhina O.N., Burova O.I., Kolesnikova Yu.R. Vnutrividovaya izmenchivost' elementnogo sostava yarovoi myagkoi pshenitsy i ee svyaz' s urozhainost'yu i povrezhdeniem list'ev vreditelyami [Intraspecific variability of the elemental composition of spring common wheat and its correlation with productivity and leaf damage by pests] // Biosfera. 2014. № 4. S. 359–364.

5. Koryagin Yu.V., Koryagina N.V. Ekologo-agronomicheskaya otsenka primeneniya mikrobiologicheskikh udobrenii v rastenievodstve dlya obespecheniya ekologicheskoi bezopasnosti cheloveka [Ecological and agronomic estimation of the use of microbiological fertilizers in plant production to ensure human environmental safety] // Kachestvo zhizni naseleniya i ekologiya. 2018. S. 110–151.

6. Nazarov A.M., Garan'kov I.N., Tuktarova I.O., Sal'manova E.R., Arkhipova T.N., Ivanov I.I., Feoktistova A.V., Prostyakova Z.G., Kudoyarova G.R. Soderzhanie fitogormonov i rost pobegov u pshenitsy (*Triticum durum* Desf.) pod vliyaniem gumatov natriya v sostave granulirovannykh organomineral'nykh udobrenii [The content of phytohormones and shoot growth in wheat (*Triticum durum* Desf.) under the effect of sodium humates in the composition of granular organomineral fertilizers] // Sel'skokhozyaistvennaya biologiya. 2020. T. 55, № 5. S. 945–955.

7. Novikova N.E., Groshchev S.N., Bobkov S.V. Otzyvchivost' gorokha na udobreniya i regulatory rosta [Pea responsiveness to fertilizers and growth regulators] // Zemledelie. 2014. № 2. S. 38–40.

8. Sid'ko A.F., Botvich I.Yu., Pis'man T.I., Shevyrnogov A.P. Otsenka soderzhaniya khlorofilla i urozhainosti zernovykh kul'tur po khlorofill'nomu potentsialu [Estimation of chlorophyll content and grain crop productivity based on chlorophyll potential] [Elektronnyi resurs] // Biofizika. 2017. T. 62, № 3. S. 565–569. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29107893&> (data obrashcheniya: 13.11.2023)

9. Smetannikova A.F., Kosolapova A.I., Korlyakov K.N., Onosov D.V., Fomin D.S., Yamaltdinova V.R., Shishkov D.G., Onosova D.F. Kontseptsiya ispol'zovaniya komplksnykh udobrenii prolongirovannogo deistviya na osnove otkhodov pererabotki kalino-magnievyykh rud kak novoi paradigmy v uluchshenii plodorodiya pochv [The concept of using complex long-acting fertilizers based on waste from processing potassium-magnesium ores as a new paradigm in improving soil fertility] // Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva. 2019. № 100. S. 133–158.

10. Shupinskaya I.A., Samsonova N.E., Antonova N.A. Vliyanie korneвого i foliarnogo pitaniya rastenii mineral'nymi udobreniyami i soedineniyami kremniya na pokazateli fotosinteticheskoi deyatel'nosti i urozhainost' zerna yarovoi pshenitsy [The effect of root and foliar nutrition of plants with mineral fertilizers and silicon compounds on the parameters of photosynthetic activity and grain productivity of spring wheat] // Agrokhiimiya. 2017. № 2. S. 11–18.

11. Yudina P.K., Ivanova L.A., Ronzhina D.A., Zolotareva N.V., Ivanov L.A. Var'irovanie parametrov list'ev i soderzhaniya pigmentov u trekh vidov stepnykh rastenii v zavisimosti ot aridnosti klimata [Variation

of leaf parameters and pigment content in three species of steppe plants depending on climate aridity] // *Fiziologiya rastenii*. 2017. № 64 (3). С. 190–203. DOI:10.7868/s0015330317020142

12. Agarie S., Agata W., Kubota F., Kaufman P.B. Physiological roles of silicon in photosynthesis and dry matter production in rice plants: I. Effects of silicon and shading treatments // *Japanese journal of crop science*. 1992. Vol. 61, № 2. P. 200–206. DOI: 10.1626/jcs.61.200

13. Hu Y., Burcus Z., Schmidhalter U. Effect of foliar fertilization application on the growth and mineral nutrient content of maize seedlings under drought and salinity // *Soil Science and Plant Nutrition*. 2008. Vol. 54, № 1. P. 133–141. DOI: 10.1111/j.1747-0765.2007.00224.x

14. Rahimzadeh S., Sohrabi Y., Pizad A., Sheykhbaglou R. Effect of biological and chemical fertilization on the yield and nutrients of Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) seeds // *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2017. Т. 10, № 3. С. 323–332.

15. Resende A. C. R., Pereira R., Nunes C., Cruz S., Calado R., Cartaxana P. Photosynthetic pigment and carbohydrate profiling of *fucus vesiculosus* from an iberian coastal lagoon // *Plants*. 2023. Vol. 12, № 6. Article number: 1234. DOI: 10.3390/plants12061324

Поступила: 02.10.23; доработана после рецензирования: 22.12.23; принята к публикации: 22.12.23.

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.