Научная статья
УДК 631.589.2.:631.867:633.11
doi: 10.55186/25876740_2026_69_5_709

АНАЛИЗ РОСТА И БИОХИМИИ МИКРОЗЕЛЕНИ ПШЕНИЦЫ В ГИДРОПОННОЙ КУЛЬТУРЕ НА ФОНЕ ВНЕСЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

С.И. Лоскутов[1], Я.В. Пухальский[1], О.В. Буханцев[1], А.И. Осипов[2]

[1]Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, Санкт–Петербург, Россия
[2]Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Цель исследования — оценить влияние экстракта зоогумуса черной львинки (*Hermetia illucens* L., ЗГ) и его комбинации с минеральным удобрением Tripart на рост и биохимический состав микрозелени пшеницы (*Triticum aestivum* L.) при гидропонном выращивании. Десятисуточный опыт проводили в условиях закрытого гроутента по четырем вариантам: контроль (вода), Tripart 100%, 0,33% щелочной экстракт ЗГ и смешанный вариант (70% Tripart + 30% ЗГ). Элементный состав зеленой биомассы анализировали методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-ОЭС, ICPE-9000), аминокислотный профиль — капиллярным электрофорезом; статистику вели однофакторным дисперсионным анализом (ANOVA), анализом главных компонент (ГК) и иерархической кластеризацией. Установлено, что растения на минеральном и органическом фоне превышали контроль по биомассе побегов. Суммарное содержание 13 элементов в варианте с ЗГ (5929 мг/кг) оказалось сопоставимым с Tripart (5924 мг/кг) и достоверно превышало контроль (3521 мг/кг). Смешанный вариант обеспечивал максимальное накопление железа (+68% к контролю), цинка (+68%), магния и меди вследствие хелатирующего действия гуминовых кислот ЗГ. Суммарный аминокислотный пул возрастал в ряду: контроль (19,98 мг/г) < ЗГ (28,44 мг/г) < Tripart (33,69 мг/г) < 70%+30% (36,89 мг/г); вариант с ЗГ специфически повышал содержание тирозина и аргинина. По всем 30 биохимическим показателям зафиксированы высоко достоверные межвариантные различия ($p < 0,001$). Анализ главных компонент выделил два независимых вектора вариации: общий нутриентный градиент (PC1) и специфику органического питания (PC2). Для гидропонного производства микрозелени пшеницы рекомендуется комбинированный питательный раствор (70% Tripart + 30% экстракт ЗГ) как обеспечивающий наивысшее суммарное качество продукции при 30% снижении дозы промышленного минерального удобрения.

Ключевые слова: микрозелень, пшеница, урожайность, аминокислоты, минеральный состав

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FGUS 2024-0010).

Original article

ANALYSIS OF GROWTH AND BIOCHEMISTRY OF WHEAT MICROGREENS IN HYDROPONICS CULTURE WITH THE APPLICATION OF ORGANIC AND MINERAL FERTILIZERS

S.I. Loskutov[1], J.V. Pukhalsky[1], O.V. Bukhantsev[1], A.I. Osipov[2]

[1]All-Russian Research Institute for Food Additives — a branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, St. Petersburg, Russia
[2]Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia

Abstract. The aim of the study was to evaluate the effect of black soldier fly (*Hermetia illucens* L., BSF) zoohumas extract and its combination with mineral fertilizer Tripart on the growth and biochemical composition of wheat (*Triticum aestivum* L.) microgreens in hydroponic culture. A 10-day experiment was conducted in a closed grow tent with four treatments: control (water), Tripart 100%, 0.33% alkaline BSF zoohumas extract (ZH), and a mixed variant (70% Tripart + 30% ZH). Elemental composition of green biomass was analyzed by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES, ICPE-9000); amino acid profile was determined by capillary electrophoresis. Statistical analysis included one-way ANOVA, principal component analysis (PCA), and hierarchical clustering. Plants grown on mineral and organic backgrounds significantly exceeded the control in shoot biomass. Total content of 13 elements in the ZH variant (5929 mg/kg DW) was statistically comparable to Tripart (5924 mg/kg DW) and significantly exceeded the control (3521 mg/kg DW). The mixed variant provided maximum accumulation of iron (+68% vs. control), zinc (+68%), magnesium, and copper due to the chelating effect of ZH humic acids. The total amino acid pool increased as follows: control (19.98 mg/g DW) < ZH (28.44 mg/g DW) < Tripart (33.69 mg/g DW) < 70%+30% (36.89 mg/g DW); the ZH variant specifically elevated tyrosine and arginine contents. Highly significant inter-treatment differences were found for all 30 biochemical parameters ($p < 0.001$). PCA identified two independent variation vectors: a general nutrient gradient (PC1) and organic nutrition specificity (PC2). A combined nutrient solution (70% Tripart + 30% BSF zoohumas extract) is recommended for hydroponic wheat microgreens production, providing the highest overall product quality with a 30% reduction in industrial mineral fertilizer use.

***Keywords*:** microgreens, wheat, yield, amino acids, mineral composition

Acknowledgments*:* the work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FGUS 2024-0010).

Введение. Обеспечение устойчивого производства продовольствия в условиях нарастающей урбанизации и ограниченности природных ресурсов остаётся одной из ключевых задач современного сельского хозяйства. Параллельно с этим в мире последовательно возрастает спрос на функциональные продукты питания с высокой концентрацией биоактивных веществ, доступные в формате локального и круглогодичного производства. Микрозелень, представляющая собой ювенильные побеги овощных, злаковых и зернобобовых культур, убираемые на 7-21-й день вегетации, органично соответствует данному вектору развития, формируя специфический сегмент в категории

© Лоскутов С.И., Пухальский Я.В., Буханцев О.В., Осипов А.И., 2026

таких продуктов. Несмотря на то, что применение микрозелени в качестве элемента декорирования блюд вошло в практику шеф-поваров ещё с конца 1980-х годов [1], именно в настоящий период её востребованность достигла беспрецедентно высокого уровня. Сейчас ее называют не иначе, как функциональный продукт XXI века [2]. Это обусловлено тем, что накопленные к настоящему времени данные свидетельствуют о том, что микрозелень содержит значительно более высокие концентрации витаминов, антиоксидантов, полифенолов, каротиноидов и минеральных элементов по сравнению со зрелыми растениями тех же видов [3-4]. Согласно аналитическим данным, рынок микрозелени характеризуется устойчивым ростом. Несмотря на спад, вызванный пандемией COVID-19 в 2019 году, вследствие закрытия предприятий общественного питания, по различным прогнозам, ожидается резкое повышение спроса к 2030 году [5].

Пшеница (*Triticum aestivum* L.) является одной из важнейших зерновых культур в мире и традиционно рассматривается как значимый источник макро- и микроэлементов в рационе человека. В многочисленных исследованиях с применением метода оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-ОЭС/ICP-OES) установлено, что зерно и микрозелень пшеницы богаты кальцием, магнием, калием, железом, цинком, марганцем, медью и рядом других эссенциальных элементов, при этом их количественное содержание существенно варьирует в зависимости от сорта, условий возделывания и агрохимического фона [6-8].

Гидропонное выращивание различной микрозелени, включая пшеницу, обладает рядом очевидных преимуществ перед традиционными технологиями, поскольку оно позволяет точно регулировать состав питательной среды, сокращать расход воды, исключать применение пестицидов, снижать риски заболеваний и значительно ускорять цикл производства [9-10]. Вместе с тем интенсивное использование минеральных удобрений в гидропонных системах сопряжено с рядом хорошо известных проблем: накопление нитратов в биомассе, нарушение кислотности, высокая себестоимость промышленных питательных растворов и несоответствие принципам «зелёной» экономики замкнутого цикла. В связи с этим активно ведётся поиск органических альтернатив минеральным удобрениям, способных обеспечить растения необходимыми биогенными элементами питания без перечисленных недостатков.

Одним из наиболее перспективных направлений является использование зоогумуса — нового типа органического удобрения, получаемого как побочный продукт биоконверсии органических отходов личинками синантропной мухи чёрная львинка (*Hermetia illucens* L., Diptera: Stratiomyidae) [11-12]. Личинки этого насекомого способны эффективно перерабатывать разнообразные органические субстраты — пищевые отходы, навоз, растительные остатки, трансформируя их в богатый питательными веществами продукт [13-15]. Зоогумус чёрной львинки содержит органический азот, фосфор, калий, кальций, магний и широкий спектр микроэлементов, а также гуминовые вещества и хитин, которые выступают в роли биостимуляторов роста и биофунгицидов [16-18]. Проведенные ранее исследования показывают, что нативное сырье в виде сухого порошка зоогумуса соответствует стандартам качества, установленных ГОСТ 33830-2016 и 53117-2008 для органических удобрений на основе отходов животноводства [19].

Жидкие экстракты зоогумуса представляют собой удобную и технологичную форму применения данного удобрения в гидропонных системах: они легко дозируются, не засоряют систему полива и совместимы с широким диапазоном типов установок. Особого внимания заслуживают данные о возможности частичного замещения ими минеральных удобрений при возделывании пшеницы. Результаты мультисайтового (мультилокационного) полевого эксперимента в провинции Шаньдун (2021–2022) показали, что замена 15% и 30% химического азота органическими удобрениями достоверно повышает содержание железа на 24,69% и цинка на 19,19% в зерне пшеницы, при этом урожайность культуры сохраняется на уровне контрольных вариантов [20]. Сопоставимые выводы получены в независимых исследованиях: режим 30% замещения минерального азота органическими источниками признан оптимальным с точки зрения совокупности агрономических и экологических показателей: стабильности урожая, улучшение здоровья почвы, снижения эмиссии N_2O и повышения эффективности использования азота [21-25].

Идея использования экскрементов насекомых в качестве органического удобрения в нашей стране появилась относительно недавно в связи с активным развитием энтомоиндустрии — использовании технологий, продуктов из насекомых в различных отраслях народного хозяйства [26]. Однако, влияние экстактов зоогумуса чёрной львинки на рост, развитие и биохимический состав микрозелени пшеницы при гидропонном выращивании остаётся практически неизученным. Между тем, на мировом уровне, исследования влияния зоогумуса на повышение урожайности пшеницы в научной литературе уже известны [27].

Цель исследования — оценить влияние различных соотношений экстракта зоогумуса чёрной львинки (*Hermetia illucens*) и стандартного минерального питательного раствора на рост, продуктивность и биохимический профиль зелёной биомассы микрозелени пшеницы в условиях гидропонной культуры.

Материалы и методы. Объектом для исследований послужили семена пшеницы компании ООО «Никольские проростки» (Россия).

Растения выращивали при полной светокультуре в закрытом гроутенте (150×150×200 см) с приточной вентиляцией (рис. 1) на базе ВНИИПД в 2026 году.

Показатели микроклимата рабочей зоны: влажность 60-65% и температура 24-25°C днём и 18-22°C ночью. В качестве единственного источника освещения использовали шесть светодиодных ламп с линзами (SpecLed, Украина) по 100 Вт каждый, с возможностью диммирования степени инсоляции. Показатели освещённости с высоты подвеса 1,0 м составляли следующие значения: 29659,6 Lx или 444,9 мкмоль/м^2/с. Фотопериодизм равнялся 16 часов день / 8 часов ночь. Замеры приходящего энергопотока света на рабочую площадь проводили с помощью люксметра (Voltcraft LX-1108, Германия) и спектрофотометра (Ocean Optics STS-VIS, США). Пересчёт люксов в мкмоли вели согласно формуле для белого света.

Растения выращивали в пластиковых контейнерах с погружёнными в жидкость лотками. На каждый лоток (16×16 см) рассыпали по 37 г семян, исходя из рекомендованной нормы для гидропонного выращивания [10]. В каждый контейнер заливали по 3 литра готового питательного раствора и подключали систему аэрации.

В качестве нативного сырья для приготовления экстрактов брали зоогумус компании ООО «Экобелок» (Россия). Общее содержание органического вещества в сухом порошке равнялось 82,8% (ГОСТ 26213), органического углерода — 34,2% (ГОСТ 10694-2024), общего азота — 1,8% (ГОСТ Р 58596-2019), гуминовых

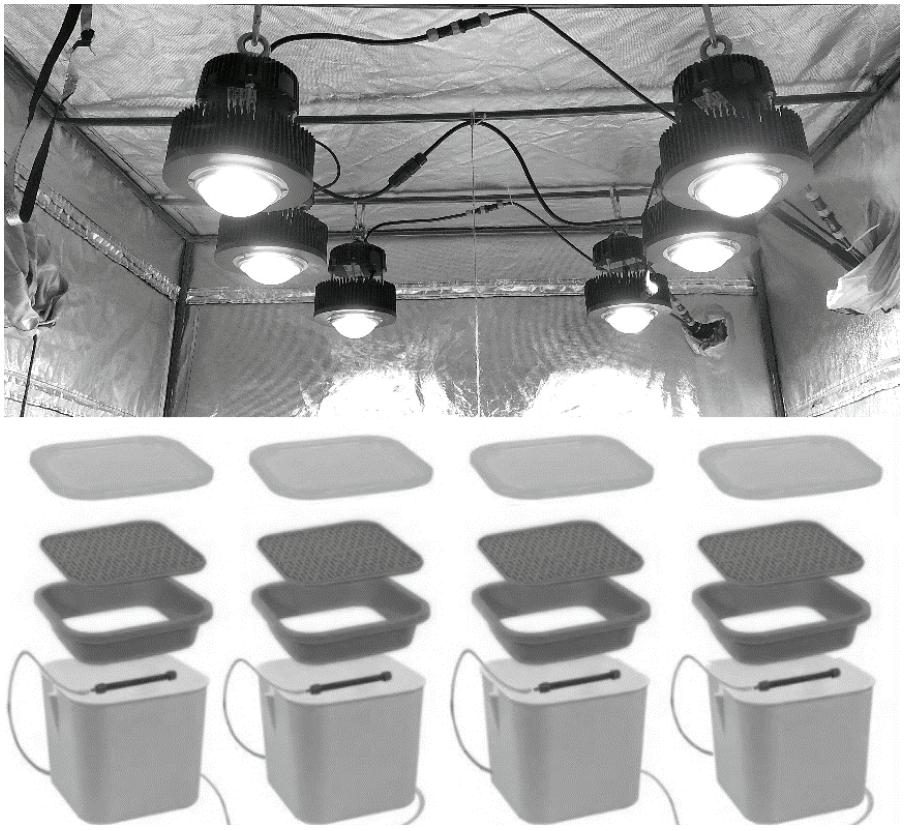


Рисунок 1. **Внешний вид гидропонных систем с аэрацией для выращивания пшеницы в закрытом гроутенте при полной светокультуре**
Figure. 1. **External appearance of hydroponic systems with aeration for growing wheat in a closed grow tent with full light culture**

кислот — 9,8% (Пономарёвой В.В. и Плотниковой Т.А.). Соотношение C/N составляло 19:1. Компост с соотношением C/N менее 20:1 полезен для растений, поскольку органический азот минерализуется в неорганический азот, который затем становится доступным для усвоения растениями.

В качестве рабочих концентраций экстрактов зоогумуса использовали 0,33% разведения, что готовили из исходного стока, соответствующего 100 г зоогумуса, разведённого в 900 мл 0,1 н раствора щёлочи. Концентрации также были выбраны с учётом сопоставления общей минерализации (ppm) получаемых питательных растворов полной, получаемой при использовании коммерческого минерального удобрения TriPart (Terra Aquatica, Франция) в рекомендованной дозе на ранней фазе развития проростков. В качестве контроля выступала фильтрованная вода.

Схема опыта приведена ниже:

- Контроль (фильтрованная водопроводная вода) — pH = 7,0; 93 ppm
- Комплексный р-р минерального удобрения TriPart — pH = 7,0; 450 ppm
- 0,33% добавка щелочного экстракта зоогумуса — pH = 6,7; 480 ppm
- 70% добавка от полной дозы TriPart + 30% от щелочного экстракта зоогумуса (0,099%) — pH = 6,4; 450 ppm.

Конечная кислотность раствора до оптимальных значений для выращивания пшеницы (6,5-7,0) на вариантах с зоогумусом подводилась серной кислотой. На каждый вариант приходилось по четыре повторности (контейнера). Длительность опыта составила 10 суток.

Суммарно по компонентам конечный минеральный состав готовых питательных растворов TriPart и 0,33% зоогумуса был схож, однако отличался по отдельным элементам. Так, зоогумус был богаче ионами калия, что логично при щелочной экстракции, а раствор TriPart — кальцием, магнием, натрием и серой. В таблице 1 приведены данные анализа растворов, полученные с помощью метода атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе ICPE-9000 (Shimadzu, Япония).

По окончании эксперимента проводили оценку изменения морфометрических показателей растений (масса и длина ростков с каждого лотка). Также проводили анализ изменения кислотности и степени минерализации остатков питательного раствора в контейнерах.

Для оценки накопления элементов полученное сырье высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали и проводили мокрое озоление в системе микроволнового разложения M6 (PreeKem, Китай) смесью концентрированной азотной кислоты (4 мл) и перекиси водорода (2 мл). Полученные растворы количественно переносили в мерные полиэтиленовые флаконы объемом 20 мл и доводили до метки деионизированной водой, после чего анализировали в методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно- 8 связанной плазмой на приборе ICPE-9000 (Shimadzu, Япония). Для каждого элемента строилась градуировочная кривая. В качестве эталонных растворов использовались многоэлементные калибровочные стандарты для ICP-спектрометрии Inorganic Venrures (США) IV-STOCK-21 и IV-STOCK-29

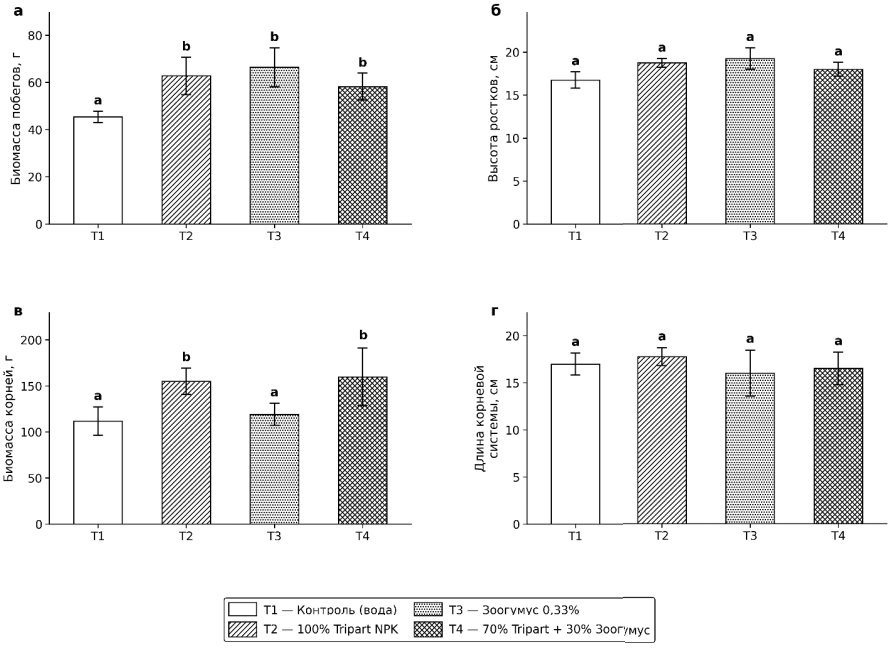
Для анализа аминокислот брали навеску образца (100±10 мг), вносили в виалы для гидролиза, добавляли 10 мл раствора 6 М соляной кислоты. Проводили гидролиз при температуре 110°С в течении 16 часов. После охлаждения пробы фильтровали через фильтр «синяя лента». Для получения ФТК- производных гидролизат или экстракт пробы в объеме 50 мкл отбирали в бюксы и выпаривали в струе теплого воздуха досуха. Затем к высушенным образцам вносили 150 мкл раствора карбоната натрия концентрацией 0,1 моль/л и 300 мкл раствора ФИТЦ. Выдерживали в закрытых бюксах 35 мин при комнатной температуре. Затем растворы высушивали досуха в струе теплого воздуха. Сухие остатки растворяли в 500 мкл дистиллированной воды перед анализом. Для анализа также использовали систему капиллярного электрофореза Капель-205. Кассета с капилляром № 2931.5, внутренний диаметр 50 мкм, общая длина капилляра 75 см; эффективная длина капилляра — 66 см; температура — 30°С, ввод пробы — 30 мбар, 5 с, напряжение — 25 кВ, давление при анализе — 0 мбар, 50 мбар для глутаминовой и аспарагиновой кислот, длина волны детектирования — 254 нм, время регистрации ЭФГ — 22 мин, фоновый электролит — раствор по методике М 04-94-2021.

Обработку полученных данных выполняли с помощью языка программирования Python 3.10. В расчётах использовали дисперсионный, кластерный и PCA-анализы.

Результаты и обсуждение. Растения, выращенные на минеральном, органическом и комбинированном удобрительном фоне значимо превышали контроль по биомассе побегов (рис. 2а). На органическом фоне в сравнении с минеральным отмечено снижение ризогенеза (рис. 2г). Этот факт можно объяснить тем, что минеральные удобрения стимулируют чрезмерный рост корней, а органические действуют более пролонгированно, обеспечивая сбалансированный рост, в результате чего растения сразу переключают цикл своего развития на набор надземной биомассы. По высоте побегов и длине корней разницы по вариантам не обнаружено. Можно предположить, что, несмотря на

Таблица 1. **Минеральный состав готовых рабочих растворов для выращивания пшеницы по вариантам опыта, мг/л**
Table 1. **Mineral composition of ready-made working solutions for growing wheat according to experimental variants, mg/l**

Элемент	Минеральный раствор Tripart (100% доза)	0,33% р-р зоогумуса	70% от полной дозы TriPart + 30% от щелочного экстракта зоогумуса (0,099%)
Барий	0,01±0,00	0,02±0,00	0,01±0,00
Кальций	26,8±0,26	4,44±0,96	20,09±0,61
Медь	0,03±0,00	0,02±0,00	0,03±0,01
Железо	0,92±0,03	0,64±0,11	0,84±0,07
Калий	58,9±2,21	100,98±8,15	71,52±5,18
Магний	13,10±0,19	3,23±0,73	10,14±0,46
Марганец	0,37±0,01	0,06±0,01	0,28±0,01
Молибден	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00
Натрий	2,88±0,09	1,67±0,33	2,52±0,21
Фосфор	21,80±0,58	16,4±2,16	20,18±1,37
Сера	17,20±0,62	9,48±2,26	14,88±1,44
Стронций	0,19±0,01	0,01±0,00	0,14±0,01
Цинк	0,15±0,01	0,08±0,01	0,13±0,01
Сумма	142,37	137,04	140,77



Примечание: над столбцами указаны буквы статистической значимости (t-критерий Стьюдента, поправка Бонферрони, α = 0,05); одинаковые буквы — различия недостоверны. Ошибки — ±SD, n = 4.

Рисунок 2. **Биометрические показатели пшеницы выращенной в закрытом гроутенте в течении 10 суток.**
а — биомасса побегов, б — высота побегов, в — биомасса корней, г — длина корней
Figure 2. **Biometric parameters of wheat grown in a closed grow tent for 10 days.**
a — shoot biomass, b — shoot height, c — root biomass, d — root length

сходные значения урожайности, растения на органическом фоне находились в состоянии стресса, обусловленного недостатком легкодоступных питательных элементов и медленной минерализацией органического вещества в растворе. Для мобилизации элементов питания корни начинали активно выделять органические кислоты, что со временем вызывало ацидификацию (подкисление) питательной среды. Данный механизм секреции корневых экссудатов в ризосфере как ответ на стрессовые воздействия хорошо охарактеризован для пшеницы. Дополнительный вклад в подкисление раствора могла вносить активизация сапрофитных микроорганизмов, присутствующих в зоогумусе, которые продуцируют собственные кислоты при разложении органики.

Конечные показатели раствора, зарегистрированные по завершении опыта, представлены ниже:

- Контроль (фильтрованная водопроводная вода) — pH = 4,9; 31,6 ppm
- Комплексный р-р минерального удобрения TriPart — pH = 7,0; 145,3 ppm
- 0,33% добавка щелочного экстракта зоогумуса — pH = 4,4; 53,1 ppm
- 70% добавка от полной дозы TriPart + 30% от щелочного экстракта зоогумуса (0,099%) — pH = 6,4; 102,3 ppm.

Пшеница толерантна к экстремальным значениям pH и способна адаптироваться к кислотно-щелочным условиям, модифицируя свойства корневой системы. Именно этим можно объяснить подавление биомассы корней в варианте с чисто органическим питанием. Наряду с резким падением pH было зафиксировано снижение степени минерализации среды, что могло быть следствием либо поглощения (транслокации) солей растением, либо частичного выпадения их в осадок, хотя осаждение более типично для щелочных условий. Поскольку уменьшение минерализации наблюдалось также при комбинированном внесении двух типов удобрений, разумно предположить, что активизация потребления питательных веществ обусловлена изменением мембранной проницаемости и представляет собой неспецифическую адаптивную реакцию на стресс, вызванный исходным недостатком питания. При этом в варианте с комбинированным внесением, равно как и в варианте с отдельным применением минеральных удобрений, pH стабильно оставался в оптимальных пределах, благодаря наличию в растворе нитратов и сохранению буферности системы.

Суммарное содержание всех анализируемых элементов в вариантах с питательными растворами было сопоставимо: зоогумус — 5929 мг/кг; Tripart — 5924 мг/кг; 70%+30% — 5849 мг/кг, тогда как в контроле не превышало 3521 мг/кг (табл. 2). Это свидетельствует о том, что 0,33%-й экстракт зоогумуса по суммарной минеральной насыщенности биомассы полностью сопоставим с полной нормой минерального удобрения Tripart. Вместе с тем между вариантами выявлены существенные различия по отдельным элементам.

Вариант с зоогумусом обеспечивал максимальное накопление калия (3039 мг/кг), фосфора (662 мг/кг) и серы (822 мг/кг), что соответствует высокой концентрации K^+ в щелочном экстракте зоогумуса, зафиксированной при анализе питательных растворов (100,98 мг/л против 58,9 мг/л для Tripart; (табл. 2). Наибольшее содержание кальция (965 мг/кг) и бора (20,5 мг/кг) характерно для варианта с Tripart — в соответствии с высокой долей Ca^{2+} в составе трёхкомпонентного минерального раствора. Смешанный вариант 70%+30% демонстрировал максимальную аккумуляцию железа (89,3 мг/кг, +68% к контролю), цинка (67,9 мг/кг, +68%), магния (405,8 мг/кг), меди (5,3 мг/кг) и марганца (34,6 мг/кг). Данный эффект согласуется с известными данными о способности гуминовых кислот формировать хелатные комплексы с двухвалентными катионами металлов, повышая их биодоступность и транслокационную подвижность [20]. Примечательно, что содержание алюминия в варианте с зоогумусом (33,5 мг/кг) было достоверно ниже, чем в варианте с Tripart (70,3 мг/кг), что свидетельствует о частичной сорбции Al^{3+} органическим матриксом зоогумуса в питательном растворе.

Содержание суммы аминокислот в зелёной биомассе демонстрировало чёткую иерархию по вариантам опыта: контроль (19,98 мг/г) < зоогумус (28,44 мг/г) < Tripart (33,69 мг/г) < 70%+30% (36,89 мг/г) (табл. 3). Вариант с комбинированным питанием обеспечил прирост суммарного аминокислотного пула на 84,6% относительно контроля, что достоверно превышало аналогичный показатель для чистого минерального удобрения (+68,6%). По большинству незаменимых аминокислот максимальные значения также зафиксированы в варианте 70%+30%: лейцин (2,91 мг/г), изолейцин (1,68 мг/г), лизин (1,54 мг/г), метионин (0,80 мг/г), триптофан (0,21 мг/г). Особого внимания заслуживает паттерн накопления тирозина и аргинина, нарушавший общую иерархию вариантов. Содержание тирозина в варианте с зоогумусом (0,93 мг/г) превышало таковое в варианте с Tripart (0,85 мг/г), несмотря на меньший суммарный аминокислотный пул. Аналогичная инверсия наблюдалась для аргинина: зоогумус (1,96 мг/г) ≈ Tripart (1,92 мг/г). Повышенный синтез тирозина в условиях органического питания объясняется стимуляцией шикиматного пути биосинтеза ароматических аминокислот гуминовыми кислотами зоогумуса, тогда как аргинин-опосредованный эффект может быть обусловлен хитин-индуцированной активацией NO-сигнального пути, характерной для биополимеров экзоскелета насекомых [18].

Все аминокислоты взаимно высоко коррелируют друг с другом ($r > 0,97$), что подтверждает единый пул белкового синтеза, управляемый доступностью азота. Также в условиях органического питания обнаружена сильная корреляция ($r \approx 0,97$-$0,98$) между содержанием Na, Mo, B, Mn, Fe, Zn и аминокислот, что указывает на их синхронную транслокацию из питательного раствора. При этом выявлена слабая связь с накоплением алюминия.

По результатам ANOVA анализа все биохимические показатели демонстрировали высоко значимые различия между вариантами опыта ($p < 0,001$). Первая главная компонента (PC1) разделяла контрольный вариант (семенное питание, отрицательные значения) от всех питательных вариантов (положительные значения), отражая общий минерально-нутриентный градиент.

Таблица 2. **Минеральный профиль микрозелени пшеницы, мг/кг сухой биомассы**
Table 2. **Mineral profile of wheat microgreens, mg/kg dry biomass**

Элемент	1	2	3	4
Фосфор	358,5±16,5	626,0±25,2	661,5±39,3	650,0±10,9
Калий	1456,8±113,3	2834,8±140,1	3039±179,5	2638±301
Кальций	715,8±36,1	965,3±100,3	815±20,7	868,0±41,3
Магний	240,3±1,3	318,8±4,7	254,8±17,1	405,8±25,3
Сера	486,8±10,5	753,8±67,5	822,3±113,7	853,8±46,9
Натрий	95,8±3,8	157,4±6	119,3±5,0	174,9±2,2
Железо	53,3±0,6	80,3±2,3	75,4±1,6	89,3±7,8
Цинк	40,4±3,2	58,0±4,8	64,5±6,3	67,9±1,7
Медь	2,1±0,2	4,5±0,3	4,1±0,4	5,3±0,6
Марганец	13,7±1,3	33,2±3,4	25,0±0,7	34,6±1,6
Бор	6,9±0,6	20,5±0,8	13,5±1,1	18,6±0,5
Алюминий	49,8±4,1	70,3±7,3	33,5±1,3	41,3±3,0
Молибден	0,3±0,1	1,1±0,1	0,6±0,1	1,1±0,1
Сумма	**3520,5**	**5924,0**	**5928,5**	**5848,6**

Таблица 3. **Аминокислотный профиль микрозелени пшеницы, мг/г сухой биомассы**
Table 3. **Amino acid profile of wheat microgreens, mg/g dry biomass**

Компонент	1	2	3	4
Аспарагиновая к-та (Asp)	2,27±0,17	3,73±0,08	2,97±0,16	4,09±0,06
Треонин (Thr)	1,07±0,04	1,79±0,08	1,54±0,09	1,92±0,07
Серин (Ser)	2,42±0,20	4,21±0,22	3,37±0,15	4,52±0,31
Глутамин (Gln)	2,41±0,11	4,18±0,16	3,46±0,14	4,51±0,16
Пролин (Pro)	0,94±0,01	1,49±0,09	1,38±0,04	1,67±0,08
Глицин (Gly)	1,12±0,04	1,98±0,15	1,64±0,01	2,14±0,07
Аланин (Ala)	1,40±0,04	2,35±0,14	1,96±0,04	2,56±0,12
Валин (Val)	1,28±0,03	2,09±0,08	1,73±0,09	2,38±0,11
Метионин (Met)	0,44±0,02	0,76±0,03	0,62±0,02	0,80±0,01
Изолейцин (Ile)	0,87±0,04	1,50±0,07	1,21±0,08	1,68±0,13
Лейцин (Leu)	1,68±0,08	2,67±0,11	2,20±0,12	2,91±0,08
Тирозин (Tyr)	0,51±0,01	0,85±0,05	0,93±0,05	1,06±0,02
Фенилаланин (Phe)	1,07±0,06	1,83±0,03	1,54±0,04	1,95±0,08
Лизин (Lys)	0,80±0,04	1,40±0,03	1,15±0,05	1,54±0,05
Гистидин (His)	0,47±0,02	0,75±0,03	0,63±0,01	0,83±0,07
Триптофан (Trp)	0,11±0,01	0,19±0,01	0,15±0,01	0,21±0,01
Аргинин (Arg)	1,12±0,08	1,92±0,06	1,96±0,07	2,12±0,09
Сумма	**19,98**	**33,69**	**28,44**	**36,89**

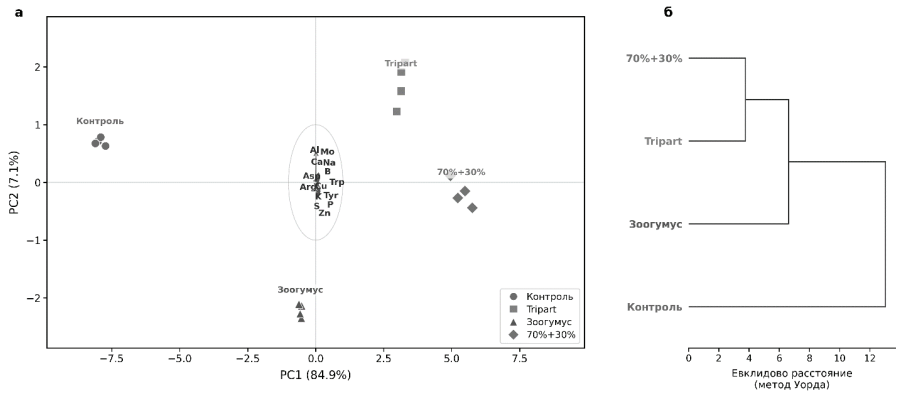


Рисунок 3. **Биплот PCA-анализа (а) и дендрограмма иерархической кластеризации (б) по 30 биохимическим показателям (13 элементов + 17 аминокислот) зелёной биомассы микрозелени пшеницы по вариантам опыта**
Figure 3. **PCA analysis biplot (a) and hierarchical clustering dendrogram (b) for 30 biochemical indicators (13 elements + 17 amino acids) of green biomass of wheat microgreens according to experimental variants**

Наибольший вклад в PC1 вносили молибден, бор, натрий, метионин, триптофан и лизин — показатели, минимально представленные в контроле и максимально накапливающиеся при внешнем минеральном питании. Вторая главная компонента (PC2) обеспечивала разделение вариантов с зоогумусом от минеральных вариантов: наибольший вклад в PC2 вносили аргинин, тирозин и калий — маркеры, специфически усиленные в условиях органического питания. Таким образом, PC2 идентифицирует уникальный «органический» метаболический профиль, формирующийся при питании на основе биоконверсионного субстрата *Hermetia illucens*.

Дендрограмма подтверждала выявленные закономерности: варианты Tripart и 70%+30% объединялись в один кластер как биохимически наиболее близкие; вариант с зоогумусом формировал отдельную органическую ветвь; контрольный вариант располагался максимально удалённо от всех питательных вариантов, что соответствует его принципиально иному источнику элементного питания, исключительно за счёт мобилизации семенных запасов.

Выводы

1. Суммарная минеральная насыщенность биомассы в варианте с зоогумусом (5929 мг/кг СВ) оказалась статистически сопоставимой с таковой в варианте Tripart (5924 мг/кг СВ), что подтверждает возможность использования 0,33% экстракта зоогумуса чёрной львинки в качестве полноценного заменителя минерального удобрения по суммарному нутриентному потенциалу. Профили отдельных элементов при этом различались: зоогумус обеспечивал максимальную аккумуляцию K, P и S; Tripart — Ca и B; комбинированный вариант — Fe (+68%), Zn (+68%), Mg и Cu.

2. Комбинированный вариант (70% Tripart + 30% зоогумус) формировал наибольший суммарный аминокислотный пул (36,89 мг/г СВ, +84,6% к контролю) и максимальное содержание всех незаменимых аминокислот, превышая оба монокомпонентных варианта. Синергетический эффект комбинированного питания выражается в одновременном поступлении легкодоступных минеральных форм N, P, K и органических стимуляторов (гуминовые кислоты, хитин), активирующих вторичный метаболизм.

3. Органическое питание специфически повышало содержание тирозина (зоогумус 0,93 мг/г > Tripart 0,85 мг/г) и аргинина (зоогумус 1,96 мг/г ≈ Tripart 1,92 мг/г), нарушая общую иерархию вариантов. Данный эффект объясняется стимуляцией шикиматного пути гуминовыми кислотами и хитин-индуцированной активацией NO-сигнального пути *H. illucens*.

4. Однофакторный дисперсионный анализ (one-way ANOVA) установил высоко достоверные различия между вариантами опыта по всем 30 переменным ($p < 0,001$). Максимальный F-критерий зафиксирован для молибдена ($F = 585$), метионина ($F = 267$) и бора ($F = 248$); минимальный — для кальция ($F = 12,9$), что отражает буферный контроль клеточных мембран над транспортом Ca^{2+}.

5. PCA-биплот и дендрограмма иерархической кластеризации (рис.3) подтвердили структурированный характер межвариантных различий: PC1 отражает общий минерально-нутриентный градиент; PC2 — специфичность органического питания. Варианты Tripart и 70%+30% образуют один биохимический кластер; зоогумус — отдельную органическую ветвь; контроль максимально удалён от всех питательных вариантов.

6. На основании комплексной оценки биометрических, минеральных и аминокислотных показателей для гидропонного производства микрозелени пшеницы рекомендуется комбинированный питательный раствор (70% Tripart + 30% экстракт зоогумуса чёрной львинки) как обеспечивающий наивысшее совокупное качество продукции при снижении доли промышленных минеральных удобрений на 30%.

Список источников

1. Аннасахедова А., Ходжакова О. Микрогрин, микрозелень — современная фуд-культура // Вестник науки. 2023. Т. 2. № 10 (67). С. 333-335.

2. Пашкевич А., Чайковский А. Микрозелень. Функциональный продукт XXI века // Наука и инновации. 2021. № 11 (225). С. 58-63.

3. Di Gioia F., Hong J.C., Pisani C., Petropoulos S.A., Bai J., Rosskopf E.N. Yield performance, mineral profile, and nitrate content in a selection of seventeen microgreen species // Frontiers in Plant Science. 2023. 14. Article 1220691. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1220691.

4. Елисеева Л.Г., Симина Д.В., Токарев П.И., Сидоренко Ю.И. Инновационные технологии производства микрозелени как важнейшего источника пищевых функциональных ингредиентов // Пищевая промышленность. 2025. № 2. С. 105-110. http://doi.org/10.52653/PPI.2025.2.2.019.

5. Asomiba R. Abaajeh. A Review of the Global Microgreens Market by most popular Species Grown, Farming Types and Practices, end users, Revenue Generated: Opportunity Analysis, and Industry Forecast // Nutrition and Food Processing/ Vol. 6(2). P. 01-07. http://doi.org/10.31579/2637-8914/134.

6. Duz M.Z., Duzgun M., Cam B., K. Celik K.S., Kilinc E. ICP-OES Multi-element Analysis of Wheat Grown in Southeastern Turkey // Atomic Spectroscopy. 2017. Vol. 38(1). P. 1-6. http://doi.org/10.46770/AS.2017.01.001.

7. Kumari T.K., Sujatha K., Savithramma N. GC-MS and ICP-OES analysis of wheat varieties in India // International Journal for Multidisciplinary Research. 2024. Vol. 6. № 5. P. 1-8. http://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i05.27975

8. Fattobene M., Liu F., Conti P., Zamponi S., Governatori C., Nardi S., Russo R.E., Berrettoni M. Distribution of Elements in Durum Wheat Seed and Milling Products: Discrimination between Cultivation Methods through Multivariate Data Analysis // Foods. 2024. Vol. 13(12). Article 1924. http://doi.org/10.3390/foods13121924.

9. Цветкова Л.А., Фирсов А.С. Анализ технологии выращивания микрозелени в гидропонной установке // Агротехника и энергообеспечение. 2025. № 2 (47). С. 65-72.

10. Кондратенко Е.П., Гаврилова А.В., Соболева О.М., Мирошина Т.А. Технология гидропонного выращивания микрозелени пшеницы // Молочнохозяйственный вестник. 2023. № 3 (51). С. 105-122.

11. Santos C.C.J., Dannon E.A., Bougna Tchoumi H.H., Mbokou S.F., Etchiha Afoha S.A.P., Mignouna D., Falade T.D.O., Phorbee O., Chougourou D.C., Tematio P., Ndindeng S.A., Djouaka R. Black soldier fly frass as a sustainable organic fertilizer: enhancing productivity of leafy vegetables and soil health in Benin // Frontiers in Plant Science. 2026. Vol. 16. Article 1663593. http://doi.org/10.3389/fpls.2025.1663593.

12. Lomonaco G., Franco A., De Smet J., Scieuzo C., Salvia R., Falabella P. Larval Frass of *Hermetia illucens* as Organic Fertilizer: Composition and Beneficial Effects on Different Crops // Insects. 2024. Vol. 15. Article 293. http://doi.org/10.3390/insects15040293.

13. Beesigamukama D., Mochoge B., Korir N.K., Fiaboe K.K., Nakimbugwe D., Khamis F.M., Subramanian S., Wangu M.M., Dubois T., Ekesi S., Tanga C.M. Low-cost technology for recycling agro-industrial waste into nutrient-rich organic fertilizer using black soldier fly // Waste Management. 2021. Vol. 119. P. 183-194. http://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.043.

14. Ungureanu N., Vlăduț N.-V. Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae and Frass: Sustainable Organic Waste Conversion, Circular Bioeconomy Benefits, and Nutritional Valorization // Agriculture. 2026. Vol. 16. Article 309. http://doi.org/10.3390/agriculture16030309.

15. Su H., Zhang B., Yang R., Shi J., He S., Dai S., Wu D., Zhao Z. The Valorization of Food Waste into High-Value Biomass and Organic Fertilizers Through Bioconversion Using Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*) // Recycling. 2026. Vol. 11. Article 8. http://doi.org/10.3390/recycling11010008.

16. Chavez M.Y., Uchanski M., Tomberlin J.K. Impacts of black soldier fly, *Hermetia illucens*, larval frass on lettuce and arugula production // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2024. Vol.8. Article 1399932. http://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1399932.

17. Lopes I.G., Yong J.W., Lalander C. Frass from black soldier fly larvae // Waste Management. 2022. Vol. 142. P. 65-76. http://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.007.

18. Escobar Rodríguez C., Zaremska V., Klammsteiner T., Kampatsikas I., Münstermann N., Weichold O., Gruber S. Chitosanobtained from black soldier fly larval cuticles expands the value chain and is effective as a biocontrol agent to combatplant pathogens // Carbohydrate Polymers. 2025. Vol. 349. Article. 123023. http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.123023.

19. Пендюрин Е.А., Рыбина С.Ю., Смоленская Л.М. Использование зоокомпоста черной львинки в качестве органического удобрения // Аграрная наука. 2020. Т. 340(7). С. 106-110. http://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-340-7-106-110.

20. Wang Y., Ma R., Wei J., Fu X., Zhang S., Zhao Z., Lin H., Xu Y., Tan D., Gao X., Liu Y. Enhancing micronutrient bioavailability in wheat grain through organic fertilizer substitution // Frontiers in Nutrition. 2025. Vol. 12. Article 1559537. http://doi.org/10.3389/fnut.2025.1559537.

21. Wu G., Yang S., Luan C., Wu Q., Lin L., Li X., Che Z., Zhou D., Dong Z., Song H. Partial Organic Substitution for Synthetic Fertilizer Improves Soil Fertility and Crop Yields While Mitigating N2O Emissions in Wheat-Maize Rotation System // European Journal of Agronomy. 2024. Vol. 154. Article. 127077. http://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127077.

22. Xie L.H., Li L.L., Xie J.H., Wang J.B., Mumtaz M.Z., Effah Z., Fudjoe S.K., Khaskheli M.A., Luo Z.Z., Li L.Z. Optimal substitution of inorganic fertilizer with organic amendment sustains rainfed maize production and decreases soil N2O emissions by modifying denitrifying bacterial communities in northern China // European Journal of Agronomy. 2024. Vol. 160. Article 127287. http://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127287.

23. Wu S., Gao T., Wu C., Yuan H., Liu Y., Liu J., Han L., Zhang C., Ma Y., Liao X. Consecutive Application of Biogas Slurry Improved the Cumulative Nitrogen Use Efficiency by Regulating the Soil Carbon Pool // Plants. 2026. Vol. 15(1). Article 102. http://doi.org/10.3390/plants15010102

24 Liu Z., Ao W., Wu S., Deng Q., Ren H., Li Q., Li H., Zhang P. Effects of Replacing Nitrogen Fertilizer with Organic Fertil-

izer on Soil Physicochemical Properties and Maize Yield in Yunnan's Red Soil // Sustainability. 2025. Vol. 17(14). Article 6634. http://doi.org/10.3390/su17146634.

25. Nyambati R., Opala P., Odhiambo G.D. Substitution of inorganic nitrogen fertilizer with organic nitrogen and its effect on soil nitrogen and maize biomass in western Kenya // African Journal of Agricultural Research. 2026. Vol. 22(2). P. 58-67. http://doi.org/10.5897/AJAR2025.16929.

26. Пушкарёва Е.А., Коваль Е.В., Лящев А.А., Валов Н.А. Исследование фитотоксичности водных вытяжек зоогумуса *Hermetia illucens* L. на жизнеспособность и развитие пшеницы // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 4 (102). С. 26-33.

27. Boudabbous K., Hammami S.B.M., Toukabri W., Bouhaouel I., Ayed S., Fraihi W., Gastli M., Chaalala S., Labidi S. Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae Frass Organic Fertilizer Improves Soil Quality and the Productivity of Durum Wheat // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2023. Vol. 54. P. 2491-2507. http://doi.org/10.1080/00103624.2023.2227208.

References

1. Annasakhledova, A. & Khodzhakova, O. (2023). *Mikrogrin, mikrozelen' — sovremennaya fud-kul'tura* [Microgreens — a modern food culture]. *Vestnik nauki* [Science Herald], vol. 2, no. 10 (67), pp. 333-335.

2. Pashkevich, A. & Chajkovskij, A. (2021). *Mikrozelen'. Funktsional'nyj produkt XXI veka* [Microgreens. A functional product of the 21st century]. *Nauka i innovatsii* [Science and Innovation], no. 11 (225), pp. 58-63.

3. Di Gioia, F., Hong, J.C., Pisani, C., Petropoulos, S.A., Bai, J. & Rosskopf, E.N. (2023). Yield performance, mineral profile, and nitrate content in a selection of seventeen microgreen species. Frontiers in Plant Science, vol. 14, art. 1220691. doi: 10.3389/fpls.2023.1220691.

4. Eliseeva, L.G., Simina, D.V., Tokarev, P.I. & Sidorenko, Yu.I. (2025). Innovatsionnye tekhnologii proizvodstva mikrozeleni kak vazhnejshego istochnika pishchevykh funktsional'nykh ingredientov [Innovative technologies for microgreens production as the most important source of functional food ingredients]. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food industry], no. 2, pp. 105-110. doi: 10.52653/PPI.2025.2.2.019.

5. Abaajeh, A.R. A review of the global microgreens market by most popular species grown, farming types and practices, end users, revenue generated: opportunity analysis, and industry forecast. Nutrition and Food Processing, vol. 6, no. 2, pp. 01-07. DOI: 10.31579/2637-8914/134.

6. Duz, M.Z., Duzgun, M., Cam, B., Celik, K.S. & Kilinc, E. (2017). ICP-OES multi-element analysis of wheat grown in southeastern Turkey. Atomic Spectroscopy, vol. 38, no. 1, pp. 1-6. DOI: 10.46770/AS.2017.01.001.

7. Kumari, T.K., Sujatha, K. & Savithramma, N. (2024). GC-MS and ICP-OES analysis of wheat varieties in India. International Journal for Multidisciplinary Research, vol. 6, no. 5, pp. 1-8. DOI: 10.36948/ijfmr.2024.v06i05.27975.

8. Fattobene, M., Liu, F., Conti, P., Zamponi, S., Governatori, C., Nardi, S., Russo, R.E. & Berrettoni, M. (2024). Distribution of elements in durum wheat seed and milling products: discrimination between cultivation methods through multivariate data analysis. Foods, vol. 13, no. 12, Art. 1924. doi: 10.3390/foods13121924.

9. Tsvetkova, L.A. & Firsov, A.S. (2025). Analiz tekhnologii vyrashchivaniya mikrozeleni v gidroponnoj ustanovke [Analysis of microgreen cultivation technology in a hydroponic system]. *Agrotekhnika i energoobespecheniye* [Agricultural technology and energy supply], no. 2 (47), pp. 65-72.

10. Kondratenko, E.P., Gavrilova, A.V., Soboleva, O.M. & Miroshina, T.A. (2023). Tekhnologiya gidroponnogo vyrashchivaniya mikrozeleni pshenitsy [Technology of hydroponic cultivation of wheat microgreens]. *Molochnokhozyajstvennyj vestnik* [Dairy Herald], no. 3 (51), pp. 105-122.

11. Santos, C.C.J., Dannon, E.A., Bougna Tchoumi, H.H., Mbokou, S.F., Etchiha Afoha, S.A.P., Mignouna, D., Falade, T.D.O., Phorbee, O., Chougourou, D.C., Tematio, P., Ndindeng, S.A. & Djouaka, R. (2026). Black soldier fly frass as a sustainable organic fertilizer: enhancing productivity of leafy vegetables and soil health in Benin. *Frontiers in Plant Science*, vol. 16, Art. 1663593. DOI: 10.3389/fpls.2025.1663593.

12. Lomonaco, G., Franco, A., De Smet, J., Scieuzo, C., Salvia, R. & Falabella, P. (2024). Larval frass of Hermetia illucens as organic fertilizer: composition and beneficial effects on different crops. Insects, vol. 15, art. 293. DOI: 10.3390/insects15040293.

13. Beesigamukama, D., Mochoge, B., Korir, N.K., Fiaboe, K.K., Nakimbugwe, D., Khamis, F.M., Subramanian, S., Wangu, M.M., Dubois, T., Ekesi, S. & Tanga, C.M. (2021). Low-cost technology for recycling agro-industrial waste into nutrient-rich organic fertilizer using black soldier fly. Waste Management, vol. 119, pp. 183-194. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.09.043.

14. Ungureanu, N. & Vlaadut, N.-V. (2026). Black soldier fly (Hermetia illucens) larvae and frass: sustainable organic waste conversion, circular bioeconomy benefits, and nutritional valorization. Agriculture, vol. 16, Art. 309. DOI: 10.3390/agriculture16030309.

15. Su, H., Zhang, B., Yang, R., Shi, J., He, S., Dai, S., Wu, D. & Zhao, Z. (2026). The valorization of food waste into high-value biomass and organic fertilizers through bioconversion using black soldier fly larvae (Hermetia illucens). Recycling, vol. 11, art. 8. DOI: 10.3390/recycling11010008.

16. Chavez, M.Y., Uchanski, M. & Tomberlin, J.K. (2024). Impacts of black soldier fly, Hermetia illucens, larval frass on lettuce and arugula production. Frontiers in Sustainable Food Systems, vol. 8, art. 1399932. DOI: 10.3389/fsufs.2024.1399932.

17. Lopes, I.G., Yong, J.W. & Lalander, C. (2022). Frass from black soldier fly larvae treatment of biodegradable wastes — a critical review and future perspectives. *Waste Management*, vol. 142, pp. 65-76. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.02.007.

18. Escobar Rodriguez, C., Zaremska, V., Klammsteiner, T., Kampatsikas, I., Munstermann, N., Weichold, O. & Gruber, S. (2025). Chitosan obtained from black soldier fly larval cuticles expands the value chain and is effective as a biocontrol agent to combat plant pathogens. Carbohydrate Polymers, vol. 349, art. 123023. DOI: 10.1016/j.carbpol.2024.123023.

19. Pendyurin, E.A., Rybina, S.Yu. & Smolenskaya, L.M. (2020). *Ispol'zovanie zookomposta chernoj l'vinki v kachestve organicheskogo udobreniya* [The use of black soldier fly zoocompost as an organic fertilizer]. *Agrarnaya nauka* [Agricultural science], vol. 340, no. 7, pp. 106-110. DOI: 10.32634/0869-8155-2020-340-7-106-110.

20. Wang, Y., Ma, R., Wei, J., Fu, X., Zhang, S., Zhao, Z., Lin, H., Xu, Y., Tan, D., Gao, X. & Liu, Y. (2025). Enhancing micronutrient bioavailability in wheat grain through organic fertilizer substitution. Frontiers in Nutrition, vol. 12, art. 1559537. DOI: 10.3389/fnut.2025.1559537.

21. Wu, G., Yang, S., Luan, C., Wu, Q., Lin, L., Li, X., Che, Z., Zhou, D., Dong, Z. & Song, H. (2024). Partial organic substitution for synthetic fertilizer improves soil fertility and crop yields while mitigating N2O emissions in wheat-maize rotation system. European Journal of Agronomy, vol. 154, art. 127077. DOI: 10.1016/j.eja.2023.127077.

22. Xie, L.H., Li, L.L., Xie, J.H., Wang, J.B., Mumtaz, M.Z., Effah, Z., Fudjoe, S.K., Khaskheli, M.A., Luo, Z.Z. & Li, L.Z. (2024). Optimal substitution of inorganic fertilizer with organic amendment sustains rainfed maize production and decreases soil N2O emissions. *European Journal of Agronomy*, vol. 160, art. 127287. DOI: 10.1016/j.eja.2024.127287.

23. Wu, S., Gao, T., Wu, C., Yuan, H., Liu, Y., Liu, J., Han, L., Zhang, C., Ma, Y. & Liao, X. (2026). Consecutive application of biogas slurry improved the cumulative nitrogen use efficiency by regulating the soil carbon pool. *Plants*, vol. 15, no. 1, art. 102. DOI: 10.3390/plants15010102.

24. Liu, Z., Ao, W., Wu, S., Deng, Q., Ren, H., Li, Q., Li, H. & Zhang, P. (2025). Effects of replacing nitrogen fertilizer with organic fertilizer on soil physicochemical properties and maize yield in Yunnan's red soil. *Sustainability*, vol. 17, no. 14, art. 6634. DOI: 10.3390/su17146634.

25. Nyambati, R., Opala, P. & Odhiambo, G.D. (2026). Substitution of inorganic nitrogen fertilizer with organic nitrogen and its effect on soil nitrogen and maize biomass in western Kenya. African Journal of Agricultural Research, vol. 22, no. 2, pp. 58-67. DOI: 10.5897/AJAR2025.16929.

26. Pushkareva, E.A., Koval, E.V., Lyashchev, A.A. & Valov, N.A. (2023). *Issledovanie fitotoksichnosti vodnykh vytiazhek zoogumusa Hermetia illucens L. na zhiznesposobnost' i razvitie pshenitsy* [Study of phytotoxicity of aqueous extracts of *Hermetia illucens* L. zoohumas on viability and development of wheat]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [News of the Orenburg State Agrarian University], no. 4 (102), pp. 26-33.

27. Boudabbous, K., Hammami, S.B.M., Toukabri, W., Bouhaouel, I., Ayed, S., Fraihi, W., Gastli, M., Chaalala, S. & Labidi, S. (2023). Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae frass organic fertilizer improves soil quality and the productivity of durum wheat. Communications in Soil Science and Plant Analysis, vol. 54, pp. 2491-2507. DOI: 10.1080/00103624.2023.2227208.

Информация об авторах:

Лоскутов Святослав Игоревич, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией промышленных биотехнологических инноваций, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8102-2900, Scopus ID: 56898840000, Researcher ID: AAX-3924-2020, SPIN-код: 2772-8395, lislosk@mail.ru

Пухальский Ян Викторович, научный сотрудник лаборатории промышленных биотехнологических инноваций, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5233-3497, Scopus ID: 57189060830, Researcher ID: ABH-1305-2021, SPIN-код: 3499-2061, puhalskyyan@gmail.com

Буханцев Олег Васильевич, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9337-9897, Scopus ID: 57223969102, Researcher ID: ABA-1083-2021, SPIN-код: 4946-5120, ovbuh86@gmail.com

Осипов Анатолий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник отдела химической мелиорации и опытного дела, Агрофизический научно-исследовательский институт, ORCID: http://orcid.org/0009-0003-3181-3792, Scopus ID: 57301879900, Researcher ID: T-18365-2018, SPIN-код: 8023-7429, aosipov2006@mail.ru

Information about the author (authors):

Svyatoslav I. Loskutov, candidate of agricultural sciences, head of the laboratory of industrial biotechnological innovations, All-Russian Research Institute for Food Additives — a branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8102-2900, Scopus ID: 56898840000, Researcher ID: AAX-3924-2020, SPIN-code: 2772-8395, lislosk@mail.ru

Jan V. Puhalsky, researcher, laboratory of industrial biotechnological innovations, All-Russian Research Institute for Food Additives — a branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5233-3497, Scopus ID: 57189060830, Researcher ID: ABH-1305-2021, SPIN-code: 3499-2061, puhalskyyan@gmail.com

Oleg V. Bukhantsev, candidate of biology sciences, researcher, All-Russian Research Institute for Food Additives — a branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9337-9897, Scopus ID: 57223969102, Researcher ID: ABA-1083-2021, SPIN: 4946-5120, ovbuh86@gmail.com

Anatoly I. Osipov, doctor of agricultural sciences, professor, chief researcher, department of chemical melioration and experimental work, Agrophysical Research Institute, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3181-3792, Scopus ID: 57301879900, Researcher ID: T-18365-2018, SPIN: 8023-7429, aosipov2006@mail.ru

✉ **puhalskyyan@gmail.com**