ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО

УДК 577.112.3:577.115.3:582.663:591.61:661.74 DOI: 10.31367/2079-8725-2025-101-6-70-81

БИОАККУМУЛЯЦИЯ КАРБОНОВЫХ КИСЛОТ В МИКРОЗЕЛЕНИ ЗЕРНОВОГО АМАРАНТА ПОД ВЛИЯНИЕМ ДОБАВОК ЗООГУМУСА

С.И. Лоскутов[1], кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией промышленных биотехнологических инноваций, lislosk@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8102-2900;
Я.В. Пухальский[1], научный сотрудник лаборатории промышленных биотехнологических инноваций, puhalskyyan@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5233-3497;
Н.И. Воробьев[2], кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биоразнообразия сельскохозяйственных микроорганизмов, nik.ivanvorobyov@yandex.ru, ORCID 0000-0001-8300-2287;
О.В. Астафьева[1], кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории структурной переработки биоресурсов, astra39@list.ru, ORCID: 0000-0002-0187-3984;
А.И. Осипов[3], доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник отдела химической мелиорации и опытного дела, aosipov2006@mail.ru, ORCID: 0009-0003-3181-3792;
А.И. Якубовская[4], кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель отдела сельскохозяйственной микробиологии, yakubovskaya_alla@mail.ru, ORCID 0009-0001-8434-2689;
В.Р. Турковская[3], инженер-исследователь аналитической лаборатории, liatolani@mail.ru, ORCID: 0009-0008-8854-0461;
И.А. Каменева[4], кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией физиологии и экологии микроорганизмов, irina.kameneva.7@mail.ru, ORCID 0000-0003-3914-7184;
В.В. Космин[5], инженер-исследователь лаборатории климатических испытаний, jankiss88@yandex.ru, ORCID: 0009-0000-2274-2265;
М.П. Сакович[5], директор компании, jankiss88@mail.ru, ORCID: 0009-0005-5429-669X
[1]Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок – филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, 191014, г.Санкт-Петербург, Литейный пр., 55, vniipakk55@mail.ru;
[2]ФГБНУ Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, 196608, Санкт-Петербург, г. Пушкин, шоссе Подбельского, д. 3, info@arriam.ru;
[3]ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», 195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14, office@agrophys.ru;
[4]ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма», 295453, Республика Крым, г.Симферополь, ул. Киевская, 150, priemnaya@niishk.site;
[5]ООО «Organic farm Green Punch», 196624, г. Санкт-Петербург, Валдайская, 9

Исследование посвящено оценке влияния экстракта зоогумуса как нового типа органического удобрения, полученного из экскрементов личинок черной львинки (*Hermetia illucens*), на изменения в биохимическом профиле микрозелени зернового амаранта на примере двух экологически пластичных сортов – Харьковский и Воронежский. Цель работы – сравнительный анализ изменения качественных и количественных показателей биоаккумуляции органических, амино- и жирных кислот в молодых проростках растений, выращенных на различных удобрительных фонах. Эксперимент проводили в контролируемых условиях гроутента в течение семи суток. Семена проращивали в пластиковых лотках, заполненных кокосовым волокном. Добавку экстракта зоогумуса в концентрациях 0,5; 1,0 и 3,0 % сравнивали с увлажнением субстрата жидким трехкомпонентным минеральным удобрением, традиционно используемым в гидропонике. Удобрения вносили разово, в момент раскладки семян по поверхности субстрата. Контролем выступал вариант с поливом водопроводной кипяченой водой. Биохимический состав полученной зеленой биомассы анализировали методами капиллярного электрофореза и газовой хроматографии с масс-спектрометрией (ГХ-МС). На примере аминокислот оценивали индекс повышения питательной ценности и адаптационного потенциала полученной биомассы при перераспределении данных компонентов из семян в молодые побеги. Максимальный прирост биомассы у обоих сортов на 28 % относительно контроля наблюдался при использовании добавки зоогумуса в концентрации 1,0 %. На минеральном фоне прибавка у сорта Харьковский составила 11 % и 38 % – у сорта Воронежский. Концентрация 3,0 % вызвала ингибирование роста, вероятно, из-за избытка питательных элементов в составе суспензии. Разница по высоте побегов на уровне 11 % наблюдалась только у сорта Воронежский на вариантах с добавлением органики. Сорт Воронежский проявил лучшую отзывчивость на внесение органической добавки: сумма незаменимых аминокислот (НАМ) увеличилась на 15–18 %, а доля ненасыщенных жирных кислот (ННЖК), таких как линолевая и α-линоленовая, достигла 80 % от общего количества ЖК. Биохимический анализ выявил значительное увеличение содержания щавелевой кислоты у обоих сортов при добавлении зоогумуса в концентрации 1 и 3 %. Результаты были сопоставимы с внесением минеральных удобрений. Это очевидно связано с адаптацией растений к окислительному стрессу и детоксикацией кальция. При этом вариант с добавкой 0,5 % зоогумуса демонстрировал близкие к контролю значения, минимизируя риски накопления оксалатов. Анализ индексов согласованности также подтвердил, что внесение зоогумуса в данной концентрации обеспечивает оптимальную когерентность аминокислотного профиля, приближая его к эталонным значениям в семенах. Результаты имеют практическое значение для развития органического земледелия, пищевой промышленности

и создания функциональных продуктов питания с повышенной биоэнергетической ценностью. Для экологического выращивания в органической гидропонике и получения функционального продукта питания больше подходит сорт Воронежский.

Ключевые слова: *микрозелень, зерновой амарант, карбоновые кислоты, зоогумус, черная львинка.*

Для цитирования: *Лоскутов С.И., Пухальский Я.В., Воробьев Н.И., Астафьева О.В., Осипов А.И., Якубовская А.И., Турковская В.Р., Каменева И.А., Космин В.В., Сакович М.П. Биоаккумуляция карбоновых кислот в микрозелени зернового амаранта под влиянием добавок зоогумуса // Зерновое хозяйство России. 2025. Т. 17. № 6. С. 70–81. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-101-6-70-81.*

(cc) BY

BIOACCUMULATION OF CARBOXYLIC ACIDS IN GRAIN AMARANTH MICROGREENS UNDER THE EFFECT OF ZOOHUMUS ADDITIVES

S.I. Loskutov[1], Candidate of Agricultural Sciences, head of the laboratory for industrial biotechnological innovations, lislosk@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8102-2900;
Ya.V. Pukhalsky[1], researcher of the laboratory for industrial biotechnological innovations, puhalskyyan@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5233-3497;
N.I. Vorobiev[2], Candidate of Technical Sciences, leading researcher, Agricultural Microorganism Biodiversity Laboratory, nik.ivanvorobyov@yandex.ru, ORCID 0000-0001-8300-2287;
O.V. Astafieva[1], Candidate of Biological Sciences, researcher, Bioresource Structural Processing Laboratory, astra39@list.ru, ORCID: 0000-0002-0187-3984;
A.I. Osipov[3], Doctor of Agricultural Sciences, professor, main researcher of the department of chemical melioration and experimental activities, aosipov2006@mail.ru, ORCID: 0009-0003-3181-3792;
A.I. Yakubovskaya[4], Candidate of Biological Sciences, leading researcher, head of the department of agricultural microbiology, yakubovskaya_alla@mail.ru, ORCID 0009-0001-8434-2689;
V.R. Turkovskaya[3], research engineer, Analytical Laboratory, liatolani@mail.ru, ORCID: 0009-0008-8854-0461;
I.A. Kameneva[4], Candidate of Agricultural Sciences, leading researcher, head of the laboratory for physiology and ecology of microorganisms, irina.kameneva.7@mail.ru, ORCID 0000-0003-3914-7184;
V.V. Kosmin[5], research engineer, Climate Testing Laboratory, jankiss88@yandex.ru, ORCID: 0009-0000-2274-2265;
M.P. Sakovich[5], Company Director, jankiss88@mail.ru, ORCID: 0009-0005-5429-669X
[1]All-Russian Research Institute for Food Additives – Branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, 191014, Saint-Petersburg, Liteyny Av., 55, vniipakk55@mail.ru;
[2]FSBSI All-Russian Research Institute of Agricultural Microbiology, 196600, Saint-Petersburg, Pushkin, Podbelskiy Sh., 3, info@arriam.ru;
[3]FSBSI Agrophysical Research Institute, 195220, Saint-Petersburg, Grazhdanskiy pr, 14, office@agrophys.ru;
[4]FSBSI "Research Institute of Agriculture in Crimea", 295493, Republic of Crimea, Simferopol, Kievskaya Str., 150, priemnaya@niishk.site;
[5]LLC «Organic Farm Green Punch», 196624, Saint-Petersburg, Valdayskaya Str., 9

The current study deals with the estimation of the effect of zoohumus extract, a new type of organic fertilizer obtained from the excrement of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*), on changes in the biochemical profile of grain amaranth microgreens using two ecologically adaptive varieties 'Kharkovsky' and 'Voronezhsky'. The purpose of the current study was to comparatively analyze changes in the qualitative and quantitative bioaccumulation of organic, amino, and fatty acids in young plant seedlings grown under different fertilization conditions. The trial was conducted under controlled conditions in a grow tent for 7 days. The seeds were germinated in plastic trays filled with coconut fiber. The zoohumus additive at concentrations of 0.5, 1.0 and 3.0 % was compared to substrate moistened with a liquid three-component mineral fertilizer, traditionally used in hydroponics. The fertilizers were applied once, when the seeds were spread on the substrate surface. The variant with boiled tap water watering served as the control. The biochemical composition of the obtained green biomass was analyzed using capillary electrophoresis and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Using amino acids as an example there has been estimated the increase in nutritional value and adaptive potential of the obtained biomass through the redistribution of these components from seeds to young shoots. There was a maximum biomass increase for both varieties by 28 % relative to the control, when added zoohumus at a concentration of 1.0 %. With a mineral supplement, the increase of the variety 'Kharkovsky' was 11 % and that of the variety 'Voronezhsky' was 38 %. A concentration of 3.0 % has inhibited the growth, likely due to excess nutrients in the suspension. A difference in shoot height of 11% was established only for the variety 'Voronezhsky' in the variants when added organics. The variety 'Voronezhsky' has demonstrated better response to the organic additive with the total essential amino acids (EAAs) increase by 15–18 %, and the proportion of unsaturated fatty acids (UFAs), such as linoleic and α-linolenic, reached 80 % of the total FAs. Biochemical analysis has revealed a significant increase in oxalic acid content in both varieties when added zoohumus at concentrations of 1 and 3 %. The results were comparable to those obtained with mineral fertilizers. This is clearly related to the adaptation of plants to oxidative stress and calcium detoxification. Moreover, the

variant with 0.5 % zoohumus demonstrated values close to the control, minimizing the risk of oxalate accumulation. The analysis of consistency indices has also confirmed that adding zoohumus at this concentration can ensure optimal coherence of the amino acid profile, making it closer to seed reference values. These results have practical implications for the development of organic farming, food industry, and development of functional foods with increased bioenergetic value. The variety 'Voronezhsky' is more suitable for organic hydroponics cultivation and functional food production.

Keywords: *microgreens, grain amaranth, carboxylic acids, zoohumus, black soldier fly.*

Введение. Амарант – древняя двудольная культура семейства *Amaranthaceae* порядка *Caryophyllales* и подсемейства *Amaranthoideae*. Основная часть представителей рода *Amaranthus* – однолетние травянистые растения с бордовой или желто-зеленой расцветкой листьев и соцветий. По разным данным, род включает в себя от 60 до 87 видов и входит в десятку наиболее сложных в таксономическом отношении культур. Большинство видов относится к диким или сорным растениям. Наряду с гречихой и киноа род также является представителем немногочисленной группы «псевдозлаковых» растений (Соколова и др., 2024; Kaur et al., 2024).

Для российского сельского хозяйства амарант достаточно новая сельскохозяйственная культура, относящаяся к растениям С4-типа, имеющая повышенный адаптационный потенциал к болезням, засухе, жаре и вредителям. Культура при этом многоцелевая, ее можно использовать как пищевую (зерновые и овощные виды), кормовую (силос), декоративную, фармацевтическую (сквален, БАД) и техническую (производство строительных материалов). В пищевом отношении растение является богатым источником минеральных элементов: железа, меди, цинка, селена, фосфора, кальция и незаменимых аминокислот. Эксперты ООН и ученые включили зерновой амарант в список растений, которые составят основную базу питания населения планеты в XXI веке и нивелируют риск развития «скрытого» голода (Skwaryło-Bednarz et al., 2020). У культуры есть все шансы, чтобы на мировом уровне стать альтернативой Злакам. Обусловлено это тем, что зерна амаранта содержат большое количество метионина, лизина, лейцина и треонина (Procopet and Oroian, 2022). Вместе с тем качественный состав профиля незаменимых аминокислот в протеинах амаранта лучше сбалансирован и имеет наибольшее совпадение с теоретически рассчитанным идеальным белком, приравненным к белку животных. Так, если принять идеальный аминокислотный СКОР за 100 условных единиц, то СКОР белка амаранта равен 75, что максимально приближено к молочному белку, равному 72 баллам. Белок сои – 68, белок злаковых: ячменя – 63, пшеницы – 57, кукурузы – 44 (Азизов и Ахмадова, 2021: Урубков, 2018: Caselato-Sousa and Amaya-Farfán, 2012). Поэтому продукты из амаранта могут быть рекомендованы для включения в рацион людей, страдающих целиакией. По количеству более ценных первичных белков – альбумину и глобулину зерновой амарант почти вдвое превосходит их содержание в пшенице, сое, рисе, ржи и кукурузе.

Зерновыми видами считаются амарант багряный (*Amaranthus cruentus*) и амарант печальный (*A. hypochondriacus*) родом из Центральной и Северной Америки, а также амарант хвостатый (*A. caudatus*) южноамериканского происхождения. Они широко возделывается в Индии, Китае, странах Юго-Восточной Азии, Африке и Европе.

В связи с открытием в 2024 г. в Воронежской области первого в мире завода по глубокой переработке зерен амаранта на белковый концентрат, спрос на его растительную продукцию в нашей стране будет только расти. Для круглогодичного периода выращивания растений необходимо будет культивировать их в сооружениях закрытого грунта. Показано, что тепличные культуры получаются более урожайные по сравнению с растениями, выращенными на открытых полях. Помимо полного цикла возделывания до зерен, в теплице можно будет растить микрозелень амаранта, которая благодаря ее повышенной в сравнении со взрослыми растениями питательной ценности и короткому периоду вегетации может считаться «суперпродуктом» будущего (Гиш, 2022).

Для получения лекарственного сырья (ЛРС) и пищевых ингредиентов из амаранта, а также снижения себестоимости конечной продукции будут вестись поиски среди эффективных биогенных элиситоров и органических соединений в качестве альтернативной замены использования минеральных удобрений. Поскольку вся устойчивость и будущий биоэнергетический резерв растений закладываются на ранней (ювенильной) фазе роста, то изучаемые культуры на данном этапе вегетации также могут служить модельными объектами в технологии ускоренной селекции при создании новых сортов для органического земледелия, отзывчивых на внесение различных стимулирующих добавок. Подобные исследования, связанные с биотестированием и первичным анализом биохимических показателей, как правило, проводят на разновидностях гидропонной культуры, в гроубоксах/гроутентах, с регулируемыми условиями микроклимата и освещения. Делается это с целью исключения лимитирующего фактора воздействия почвы.

В последние годы среди природных стимуляторов выделяют экстракты продуктов жизнедеятельности беспозвоночных и насекомых – вермикомпост и зоогумус. И если первый уже достаточно хорошо изучен, то научных работ с зоогумусом в отечественной печати пока недостаточно. Зоогумус представляет собой сыпучий порошок из высушенных и просеянных экскрементов личинок синантропной мухи черная львинка (*Hermetia illucens*

Linnaeus, 1758). Проведенные ранее исследования показывают, что сухой зоогумус соответствует стандартам качества, установленным ГОСТ 33830-2016 и 53117-2008 для органических удобрений на основе отходов животноводства (Пендюрин и др., 2024). Таким образом, благодаря высокой биологической и питательной ценности его можно отнести к новому типу нетрадиционного органического удобрения (Пендюрин и др., 2020) и рекомендовать для совместного применения с минеральными агрохимикатами, в том числе и при выращивании микрозелени зернового амаранта.

Цель работы – сравнительная оценка изменений в профиле накопления органических, амино- и жирных кислот в микрозелени двух пластичных сортов зернового амаранта, выращенной на фоне внесения в субстрат возрастающих концентраций экстракта зоогумуса или минеральных удобрений.

Материалы и методы исследований. В качестве растительных тест-объектов для выращивания микрозелени на различных удобрительных фонах послужили семена двух сортов зернового амаранта: Харьковский и Воронежский. Сорт Харьковский занесен в Реестр растений Украины в 2001 г. как лекарственный, а Воронежский зарегистрирован в Госреестре селекционных достижений РФ как пищевой в январе 2011 г. (ООО «Русская олива»).

Эксперимент проводили в закрытом гроутенте (120 × 60 × 60 см) при интенсивной светокультуре (рис. 1). Температура воздуха во время проведения опыта составляла 23 °С при относительной влажности воздуха 70 %. Источником освещения служила светодиодная панель белого света на 150 Вт (14,0 тыс. люкс, или 210 ммоль/м^2/с ФАР). Фотопериод составил 16ч/8ч – день/ночь (Toscano et al., 2021). Срок вегетации – 7 суток.

Рис. 1. Микрозелень зернового амаранта, выращенного в гроутенте:
1 – контроль (вода); 2 – минеральное удобрение; 3 – жидкая добавка зоогумуса 0,5%;
4 – жидкая добавка зоогумуса 1,0%; 5 – жидкая добавка зоогумуса 3,0%
Fig. 1. Grain amaranth microgreens grown in a grow tent:
1 – control (Water); 2 – mineral fertilizer; 3 – 0.5% liquid zoohumus additive;
4 – 1.0% liquid zoohumus additive; 5 – 3.0% liquid zoohumus additive

Семена в количестве 3 г проращивали в пластиковых лотках, заполненных кокосовым волокном, являющимся нейтральным субстратом для хемопоники как одной из разновидностей гидропоники. Волокно предварительно увлажняли путем пролива разведенной суспензией, полученной из зоогумуса, в концентрациях 0,5, 1,0 и 3,0 %. Выбор концентраций зоогумуса основан на ранних работах авторов и других исследователей на гидропонике (Romano et al., 2022a, b; Пухальский и др., 2024). В качестве чистого контроля выступал вариант выращивания микрозелени с увлажнением волокна кипяченой водопроводной водой. Дополнительно был заложен вариант выращивания растения при внесении жидкого трехкомпонентного минерального удобрения TriPart (Terra Aquatica, Франция): Micro HW (SW) NPK: 5-0-1; Grow NPK: 3-1-6; Bloom NPK: 0-5-6, разведенного согласно инструкции производителя.

По окончании эксперимента полученную зеленую биомассу (стебель и листья) взвешивали, измеряли высоту побегов, сушили воздушно-теневым способом при комнатной температуре и затем измельчали в порошок для дальнейшего биохимического анализа.

Органические и аминокислоты определяли с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель-205». Для анализа жирных кислот применяли газовый хроматограф Agilent 8890 GH System, оснащенный масс-спектрометрическим детектором Agilent 5977B GH/MSD. Все измерения проводили в трех повторностях.

Обработку полученных данных выполняли с помощью прикладных систем Excel 2016 (Microsoft Corp., США). Также полученные результаты (на примере изучения аминокислотного профиля) были обработаны с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Подобная практика расчетов используется в работах по оптимизации белковых компонентов и когерентности белка (Егорова и др., 2014; Chitale et al., 2011). По итогу мы получа-

ем безразмерный индекс (In), оценивающий уровень внутренней когерентности молодой растительности, и перестройку в соотношении аминокислот при сравнении с их содержанием в исходных семенах как покоящихся генеративных органах. Индекс In преобразован в шкалу от 0 до 1 по формуле

In = (корреляция + 1)/2.

Чем ближе полученные значения к единице, тем выше согласованность аминокислотного профиля в микрозелени с исходным (эталонным) показателем семян. Для проведения данной процедуры аминокислоты также предварительно были проанализированы в семенах обоих сортов.

Результаты и их обсуждение. Наилучшие результаты по сбору зеленой биомассы у изучаемых сортов отмечены на варианте с минеральным фоном. Использование добавки экстракта зоогумуса в концентрации 1,0 % показало близкий к внесению минеральных удобрений результат: сбор микрозелени у сорта Харьковский здесь увеличился с 9,7 до 12,3 г, у сорта Воронежкий – с 26,0 до 33,3 г. На минеральном фоне вес биомассы равнялся, 11,3 и 36,0 г соответственно. На концентрации 3,0 % отмечено небольшое ингибирование роста, связанное, вероятно, с высокой концентрацией разбавленных эссенциальных элементов в органической суспензии. Разница по высоте побегов на уровне 11 % наблюдалась только у сорта Воронежский на вариантах с добавлением органики. По итогу эксперимента ювенильные проростки сорта Воронежский на всех вариантах опыта показали лучшую отзывчивость на действие удобрений в сравнении с контролем (рис. 2).

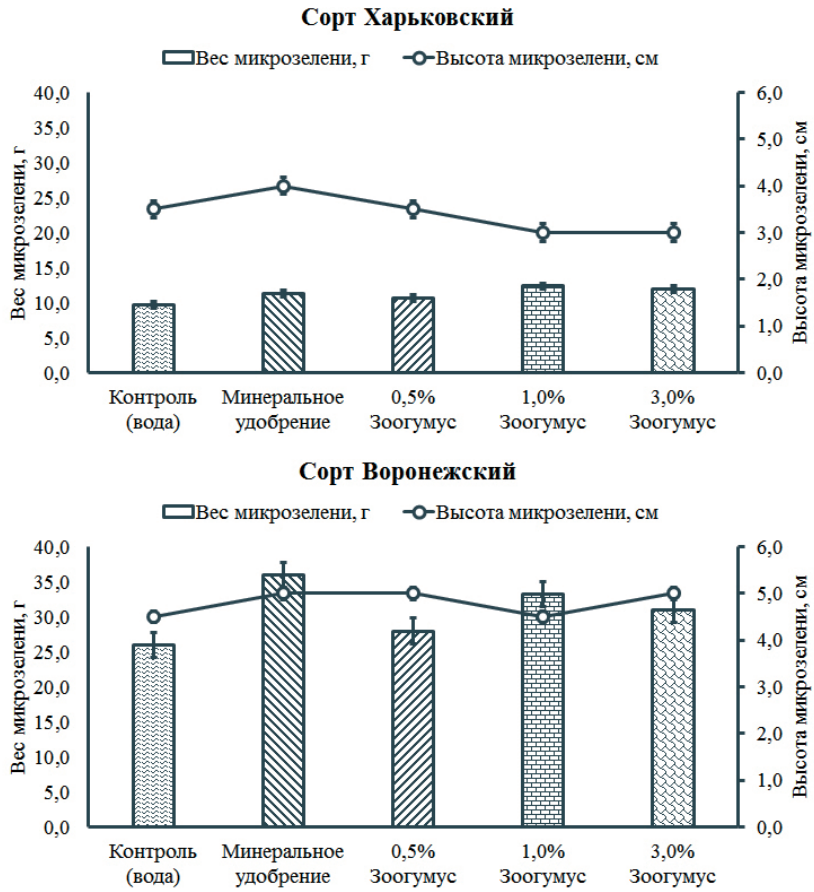

Рис. 2. Биометрические параметры развития микрозелени амаранта
Fig. 2. Biometric parameters of amaranth microgreen development

Анализ органических кислот показал увеличение доли содержания щавелевой кислоты на фоне внесения минеральных удобрений и экстракта зоогумуса в концентрациях 1 и 3 % по сравнению с контролем (табл. 1).

Накопление щавелевой кислоты может быть связано с повышением адаптационной лабильности растений к возможному окислительному стрессу или поражению насекомыми-вредителями. Также это может быть сопряжено с детоксикацией избытка накопления в растениях кальция путем образования нерастворимых оксалатов (Li et al., 2022). Стоит отметить, что употребление продуктов с высоким содержанием растворимых оксалатов приводит к риску развития сердечно-сосудистых заболеваний, остеопорозу, гипероксалурии и системному оксалозу. В крайних случаях

отмечаются нефропатия и острая почечная недостаточность из-за образования камней, которые состоят в основном из фосфата и оксалата кальция (Zayed et al., 2025). При этом нерастворимая форма оксалата менее вредна и хуже усваивается кишечником, чем растворимые соли. С другой стороны, содержание щавелевой кислоты в микрозелени в 10 раз выше, чем в виргинильных растениях. Поэтому если рассматривать ее накопление лишь как первичный триггер устойчивости к дальнейшему росту, то этот факт можно считать здесь положительным. Если же оценивать с позиции употребления готовой микрозелени, то наилучшим результатом можно считать вариант с использованием 0,5%-го экстракта зоогумуса. Концентрация щавелевой кислоты здесь была максимально приближена к значениям на контроле и даже ниже.

Таблица 1. Содержание отдельных органических кислот в микрозелени амаранта, мг/г
Table 1. Content of individual organic acids in amaranth microgreens, mg/g

Кислота	Вариант				
	контроль (вода)	минеральное удобрение	зоогумус		
			0,5%-й	1,0%-й	3,0%-й
Сорт Харьковский					
Щавелевая	168,0 ± 34,0	215,0 ± 43,0*	149,0 ± 30,0	191,0 ± 38,0	192,3 ± 36,0
Муравьиная	2,1 ± 0,4	2,2 ± 0,4	1,9 ± 0,4	2,2 ± 0,4	2,17 ± 0,4
Винная	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Яблочная	8,4 ± 1,7	8,5 ± 1,7	10,0 ± 2,0	15,0 ± 3,0*	17,73 ± 3,1*
Лимонная	15,0 ± 3,0	14,4 ± 2,9	13,1 ± 2,6	23,0 ± 5,0*	25,0 ± 4,8*
Янтарная	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Молочная	4,9 ± 1,0	6,8 ± 1,4	5,5 ± 1,1	3,7 ± 0,7	3,5 ± 0,7
Уксусная	4,8 ± 1,0	4,6 ± 0,9	4,5 ± 0,9	6,8 ± 1,4	7,4 ± 1,3
Сумма	203,20	251,50	184,00	241,70	248,13
Сорт Воронежский					
Щавелевая	141,0 ± 28,0	232,0 ± 46,0*	145,0 ± 29,0	214,3 ± 42,9	240,1 ± 43,4*
Муравьиная	1,6 ± 0,3	2,1 ± 0,4	1,0 ± 0,2	1,2 ± 0,2	0,9 ± 0,2
Винная	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Яблочная	18,0 ± 4,0	4,8 ± 1,0*	10,9 ± 2,2	8,1 ± 1,6	2,4 ± 0,7*
Лимонная	20,0 ± 4,0	9,3 ± 1,9*	15,0 ± 3,0	12,3 ± 2,5	8,1 ± 2,0*
Янтарная	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Молочная	2,6 ± 0,5	6,0 ± 1,0*	1,5 ± 0,3*	5,6 ± 1,1*	6,2 ± 1,0*
Уксусная	4,7 ± 0,9	15,0 ± 3,0*	6,4 ± 1,3	16,0 ± 3,0*	20,3 ± 3,2*
Сумма	187,90	269,20	179,80	257,50	278,00

*Примечание. * – различия статистически значимы (p ≥ 0,05).*

Анализ состава протеиногенных аминокислот не выявил резкого увеличения какого-либо из компонентов (табл. 2). Наблюдалось лишь суммарное накопление фракции на 29 % у сорта Харьковский на варианте с минеральными удобрениями. Известно, что аминокислоты способствуют росту и синтезу новых белков в метаболизме растений. Они формируют устойчивость культуры к стрессам различной природы и участвуют в процессах детоксикации ксенобиотиков.

Таблица 2. Содержание отдельных аминокислот в микрозелени амаранта, мг/г
Table 2. Content of some amino acids in amaranth microgreens, mg/g

Кислота	Вариант				
	контроль (вода)	минеральное удобрение	зоогумус		
			0,5%-й	1,0%-й	3,0%-й
Сорт Харьковский					
Заменимые аминокислоты (ЗАМ)					
моноаминомонокарбоновые					
Аланин	11,1 ± 0,2	14,4 ± 0,3*	10,1 ± 0,2*	9,8 ± 0,2*	11,3 ± 0,2
Глицин	11,1 ± 0,2	13,8 ± 0,2*	9,6 ± 0,2*	10,0 ± 0,2*	11,7 ± 0,2
Серин	9,1 ± 0,16	11,1 ± 0,2	8,5 ± 0,2	8,9 ± 0,2	9,4 ± 0,2
Тирозин	4,2 ± 0,1	5,1 ± 0,1	4,9 ± 0,1	5,1 ± 0,1	4,0 ± 0,1
моноаминодикарбоновые					
Аспарагин	27,0 ± 0,5	33,0 ± 0,7*	24,0 ± 0,5*	24,0 ± 0,5*	28,0 ± 0,5
Глутамин	22,0 ± 0,4	28,0 ± 0,6	22,0 ± 0,4	19,0 ± 0,4	21,0 ± 0,4
диаминомонокарбоновые					
Аргинин	8,5 ± 0,2	10,9 ± 0,2	7,3 ± 0,2	7,6 ± 0,2	9,0 ± 0,2

Продолжение табл. 2

Кислота	Вариант				
	контроль (вода)	минеральное удобрение	зоогумус		
			0,5%-й	1,0%-й	3,0%-й
гетероциклические					
Гистидин	1,7 ± 0,04	3,8 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,9 ± 0,1	1,9 ± 0,1
Пролин	8,7 ± 0,16	11,6 ± 0,2	8,5 ± 0,2	8,0 ± 0,1	8,6 ± 0,1
Гидроксипролин	0,3 ± 0,01	0,8 ± 0,1	0,9 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,1
Незаменимые аминокислоты (НАМ)					
моноаминомонокарбоновые					
Валин	9,2 ± 0,17	12,0 ± 0,2	9,6 ± 0,2	8,2 ± 0,2	8,6 ± 0,2
Лейцин и изолейцин	25,0 ± 0,4	31,0 ± 0,6*	22,0 ± 0,4*	22,0 ± 0,4*	26,0 ± 0,4
Метионин	1,4 ± 0,03	2,2 ± 0,1	2,1 ± 0,1	3,1 ± 0,1	1,5 ± 0,1
Треонин	10,0 ± 0,18	12,8 ± 0,2	9,4 ± 0,2	9,5 ± 0,2	10,2 ± 0,2
Фенилаланин	9,7 ± 0,22	15,0 ± 0,4	9,5 ± 0,2	8,2 ± 0,2	9,3 ± 0,2
диаминомонокарбоновые					
Лизин	10,8 ± 0,19	13,1 ± 0,2*	9,4 ± 0,17*	9,0 ± 0,2*	11,1 ± 0,15
Сумма	169,80	218,60	159,30	154,60	171,91
Сорт Воронежский					
Заменимые аминокислоты (ЗАМ)					
моноаминомонокарбоновые					
Аланин	8,6 ± 0,2	9,2 ± 0,2	8,1 ± 0,2	8,4 ± 0,2	8,2 ± 0,2
Глицин	8,5 ± 0,2	9,0 ± 0,2	8,2 ± 0,2	9,1 ± 0,2	9,2 ± 0,2
Серин	5,5 ± 0,1	6,8 ± 0,1	5,0 ± 0,1	5,5 ± 0,1	5,3 ± 0,1
Тирозин	5,6 ± 0,1	5,1 ± 0,1	5,7 ± 0,1	5,5 ± 0,1	5,5 ± 0,1
моноаминодикарбоновые					
Аспарагин	19,0 ± 0,4	20,0 ± 0,4	17,0 ± 0,3*	17,0 ± 0,3*	15,7 ± 0,3*
Глутамин	14,3 ± 0,29	14,6 ± 0,3	14,5 ± 0,3	13,8 ± 0,3	13,7 ± 0,3
диаминомонокарбоновые					
Аргинин	6,5 ± 0,2	6,5 ± 0,2	6,6 ± 0,2	8,3 ± 0,2	8,9 ± 0,2
гетероциклические					
Гистидин	2,7 ± 0,1	2,0 ± 0,1	2,3 ± 0,1	2,2 ± 0,1	1,9 ± 0,1
Пролин	8,0 ± 0,1	8,0 ± 0,1	7,8 ± 0,1	8,1 ± 0,2	8,1 ± 0,2
Гидроксипролин	1,1 ± 0,1	0,5 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,1 ± 0,1	1,1 ± 0,1
Незаменимые аминокислоты (НАМ)					
моноаминомонокарбоновые					
Валин	7,8 ± 0,1	8,2 ± 0,2	7,8 ± 0,1	8,3 ± 0,2	8,5 ± 0,2
Лейцин и изолейцин	20,0 ± 0,4	22,0 ± 0,4*	20,0 ± 0,4	23,0 ± 0,4*	24,0 ± 0,4*
Метионин	3,1 ± 0,1	3,3 ± 0,1	3,4 ± 0,1	2,8 ± 0,1	2,8 ± 0,1
Треонин	7,5 ± 0,1	7,3 ± 0,1	7,5 ± 0,1	7,7 ± 0,2	7,8 ± 0,1
Фенилаланин	8,4 ± 0,2	9,0 ± 0,2	8,4 ± 0,2	8,8 ± 0,2	8,9 ± 0,2
диаминомонокарбоновые					
Лизин	8,4 ± 0,2	9,1 ± 0,2	8,0 ± 0,1	9,5 ± 0,2*	9,7 ± 0,2*
Сумма	135,00	140,60	131,30	139,10	139,24

*Примечание. * – различия статистически значимы (p ≥ 0,05).*

Суммарное накопление жирных кислот везде было ниже контроля (табл. 3). Пальмитиновая, линолевая, а также α-линоленовая кислоты в обоих сортах содержались в больших количествах и составляли 80 % от общего количества жирных кислот.

Таблица 3. Содержание жирных кислот в микрозелени амаранта, мг/г
Table 3. Content of fatty acids in amaranth microgreens, mg/g

Кислота	Вариант				
	контроль (вода)	минеральное удобрение	зоогумус		
			0,5%-й	0,5%-й	0,5%-й
Сорт Харьковский					
Насыщенные жирные кислоты (НЖК)					
Миристиновая	0,04 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,02 ± 0,01
Стеариновая	0,88 ± 0,22	0,56 ± 0,14	0,77 ± 0,19	0,91 ± 0,23	0,74 ± 0,22
Пальмитиновая	4,05 ± 1,01	2,64 ± 0,66*	3,46 ± 0,87	3,66 ± 0,92	3,13 ± 1,01
Бегеновая	0,12 ± 0,03	0,07 ± 0,02	0,09 ± 0,02	0,10 ± 0,03	0,08 ± 0,03
Лигноцериновая	0,22 ± 0,06	0,16 ± 0,04	0,20 ± 0,05	0,20 ± 0,05	0,19 ± 0,06

Продолжение табл. 3

Кислота	Вариант				
	контроль (вода)	минеральное удобрение	зоогумус		
			0,5%-й	0,5%-й	0,5%-й
Ненасыщенные жирные кислоты (ННЖК)					
Пальмитолеиновая	0,54 ± 0,14	0,41 ± 0,10	0,48 ± 0,12	0,43 ± 0,11	0,42 ± 0,14
Олеиновая	1,44 ± 0,36	0,78 ± 0,20	1,16 ± 0,29	1,25 ± 0,31	1,00 ± 0,36
Линолевая	4,03 ± 1,01	2,76 ± 0,69*	3,49 ± 0,87	3,57 ± 0,89	3,16 ± 1,01
α-линоленовая	7,27 ± 1,82	5,73 ± 1,43	6,65 ± 1,66	5,99 ± 1,50	6,01 ± 1,82
Арахиновая	0,07 ± 0,02	0,04 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,07 ± 0,02	0,05 ± 0,02
Гондоиновая	0,05 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,06 ± 0,01
Сумма	18,71	13,19	16,44	16,25	14,86
Сорт Воронежский					
Насыщенные жирные кислоты (НЖК)					
Миристиновая	0,03 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,02 ± 0,01
Стеариновая	0,80 ± 0,20	0,47 ± 0,12	0,55 ± 0,14	0,59 ± 0,15	0,44 ± 0,12
Пальмитиновая	3,71 ± 0,93	2,52 ± 0,63*	2,50 ± 0,63*	2,85 ± 0,71	2,16 ± 0,56*
Бегеновая	0,08 ± 0,02	0,04 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,03 ± 0,01
Лигноцериновая	0,16 ± 0,04	0,12 ± 0,03	0,10 ± 0,03	0,10 ± 0,03	0,06 ± 0,02
Ненасыщенные жирные кислоты (ННЖК)					
Пальмитолеиновая	0,32 ± 0,08	0,07 ± 0,02	0,21 ± 0,05	0,28 ± 0,07	0,23 ± 0,06
Олеиновая	1,12 ± 0,28	0,81 ± 0,20	0,69 ± 0,17	0,86 ± 0,21	0,62 ± 0,16
Линолевая	3,08 ± 0,77	2,15 ± 0,54*	2,06 ± 0,52*	2,33 ± 0,58*	1,74 ± 0,46*
α-линоленовая	5,38 ± 1,34	3,11 ± 0,78*	3,84 ± 0,96	4,5 ± 1,13	3,70 ± 0,93*
Арахиновая	0,06 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,02 ± 0,01
Гондоиновая	0,03 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,04 ± 0,01
Сумма	14,76	9,36	10,10	11,65	9,06

*Примечание. * – различия статистически значимы (р ≥ 0,05).*

Однако оценивая процентное соотношение аминокислот и жирных кислот, мы наблюдали тенденцию к увеличению доли незаменимых аминокислот (НАМ) и ненасыщенных жирных кислот (ННЖК), полезных для здоровья человека, на вариантах с использованием органических добавок у сорта Воронежский (рис. 3). Соотношение НАМ/ЗАМ (в мг/г) здесь составило по вариантам: 0,69 → 0,72 → 0,72 → 0,76 → 0,80, а сооношение ННЖК/НЖК (в мг/г): 2,09 → 1,96 → 2,13 → 2,23 → 2,34. Таким образом, концентрация зоогумуса 3 % здесь продемотрировала наилучший потенциал в изменении метаболизма культуры. Для сорта Харьковский соотношение НАМ/ЗАМ осталось неизменным по всем вариантам на уровне 0,63, тогда как по сооношению ННЖК/НЖК лучший результат зафиксирован на минеральном фоне: 2,83 (против 2,52 на контроле). На варианте с зоогумусом показатели составили 2,62 → 2,32 → 2,57, что выделяет концентрацию 0,5 % зоогумуса как максимально приближенную к минеральным удобрениям.

Перераспределение амикислот из семян в микрозелень – это естественный процесс. При этом суммарное количество их может снижаться под воздействием ферментов и формирования новых тканей – стеблей и первых листьев. Аминокислоты участвуют в фотосинтетической активности, из-за чего синтезируются затем повторно. Соотношение их также претерпевает изменения. В частности, мы наблюдаем это на примере нашего эксперимента. Результаты исследования аминокислотного состава семян амаранта приведены в таблице 4. Установлено, что общее содержание различных групп аминокислот у семян обоих сортов довольно схоже и высоко (182,91 мг/г у сорта Харьковский и 185,10 мг/г у сорта Воронежский). Среди них в сумме больше всего содержалось моноаминодикарбоновых (31–39 % в общей сумме) кислот. Значительно меньше накапливалось моноаминомонокарбоновых (19–23 %), диаминомонокарбоновых (2–3 %) и гетероциклических (5–9 %) кислот. Доля незаменимых аминокислот (65 %) была выше, чем заменимых (35 %). По мере убывания содержания отдельных аминокислот можно составить следующий ряд: у сорта Харьковский – глутамин > лейцин и изолейцин > аспарагин > валин > лизин > глицин > серин > фенилаланин > метионин > тирозин > аланин > гистидин > аргинин > пролин > треонин > гидроксипролин; у сорта Воронежский – глутамин > лейцин и изолейцин > аспарагин > глицин > лизин > серин > валин > пролин > аланин > фенилаланин > треонин > гистидин > аргинин > тирозин > метионин > гидроксипролин. От общей суммы аминокислот более 3/5 составляло суммарное содержание аспарагина, глутамина, лейцина и изоцейцина.

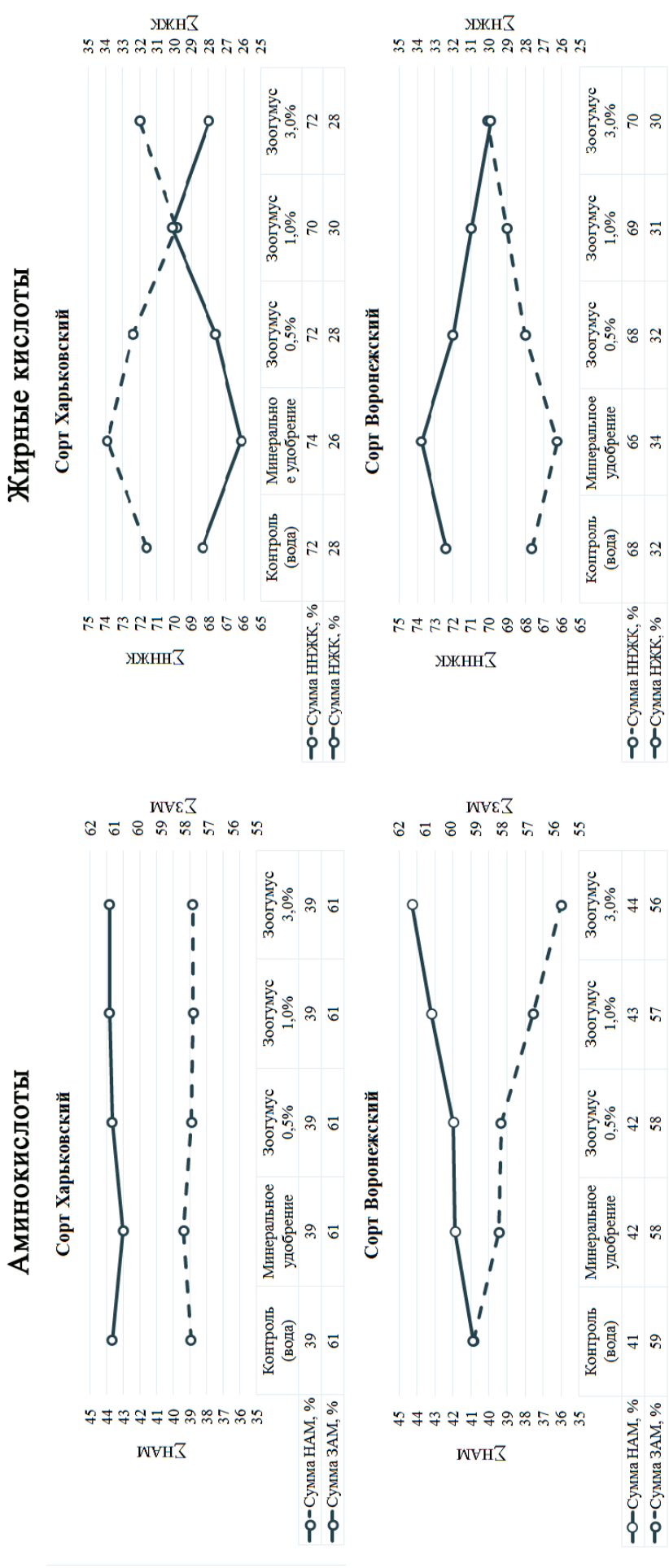

Рис. 3. Соотношение накопления аминокислот и жирных кислот в микрозелени амаранта по вариантам опыта
Fig. 3. Accumulation ration of amino acids and fatty acids in amaranth microgreens according to the experimental variants

Таблица 4. Содержание аминокислот в семенах амаранта, мг/г
Table 4. Content of amino acids in amaranth seeds, mg/g

Кислота	Сорт Харьковский	Сорт Воронежский
Заменимые аминокислоты (ЗАМ)		
моноаминомонокарбоновые		
Аланин	5,69	9,15
Глицин	10,69	16,38
Серин	9,59	11,19
Тирозин	7,98	5,46
моноаминодикарбоновые		
Аспарагин	21,75	17,10
Глутамин	48,86	39,69
диаминомонокарбоновые		
Аргинин	4,26	6,01
гетероциклические		
Гистидин	4,59	6,01
Пролин	4,02	9,30
Гидроксипролин	0,31	0,94
Незаменимые аминокислоты (НАМ)		
моноаминомонокарбоновые		
Валин	11,83	9,88
Лейцин и изолейцин	23,23	21,53
Метионин	8,02	3,70
Треонин	2,25	7,43
Фенилаланин	8,72	8,43
диаминомонокарбоновые		
Лизин	11,12	12,90

Расчет индексов In организации показал, что наибольшая согласованность аминокислотного профиля в микрозелени амаранта к их эталонному содержанию в семенах у обоих сортов отмечена при использовании 0,5%-й концентрации зоогумуса (табл. 5).

Таблица 5. Изменение индекса когерентности аминокислот из семян в микрозелень амаранта, выращенной на различных удобрительных фонах
Table 5. Change in the amino acid coherence index from seeds to amaranth microgreens grown under different fertilization conditions

Вариант		Сорт Харьковский		Сорт Воронежский	
		Суммарное содержание аминокислот	In	Суммарное содержание аминокислот	In
Семена		182,9	1,00	185,1	1,00
Микрозелень – контроль (вода)		169,8	0,72	135,0	0,88
Микрозелень – минеральное удобрение		218,6	0,85	140,6	0,92
Микрозелень – зоогумус	0,5 %	159,3	0,94	131,3	0,95
	1,0 %	154,6	0,91	139,1	0,93
	3,0 %	171,9	0,89	139,2	0,90

Выводы.

1. Экстракт зоогумуса в концентрации 1,0 % демонстрирует наибольшую эффективность, сопоставимую с минеральными удобрениями, обеспечивая прирост биомассы микрозелени у обоих сортов амаранта (до 28 %) и повышение доли незаменимых аминокислот (НАМ) и ненасыщенных жирных кислот (ННЖК).

2. Применение зоогумуса в концентрации 3,0 % вызывает ингибирование роста и значительное накопление щавелевой кислоты (до 240,1 мг/г), что требует дополнительных исследований для минимизации рисков, связанных с пищевой безопасностью.

3. Вариант с внесением 0,5%-го экстракта зоогумуса демонстрировал близкие к контролю значения, минимизируя риски накопления оксалатов. Анализ корреляций также подтвердил, что зоогумус в концентрации внесения 0,5 % обеспечивает оптимальную когерентность аминокислотного профиля, приближая его к эталонным значениям в семенах.

4. Сорт Воронежский проявил повышенную адаптацию к действию органических добавок, демонстрируя лучшие показатели биоаккумуляции питательных веществ, что делает его перспективным сортом для экологического выращивания в органической гидропонике для получения функционального пищевого ингредиента. С целью сохранения товарной биомассы и снижения себестоимости конечного продукта на нем можно также комбинировать

использование обоих видов удобрений в пользу снижения доли внесения минеральных солей. По соотношению ННЖК/НЖК и суммарному накоплению аминокислот сорт Харьковский, напротив, проявил повышенную адаптацию к действию минеральных удобрений.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (темы FGUS 2024-0010 и FGUS 2025-0005).

Библиографический список

1. Азизов И.К., Ахмадова Г.А. Аминокислотный состав семян амаранта хвостатого, произрастающего в Узбекистане // Фармация. 2021. № 7. С. 37–40. DOI: 10/29296/25419218-2021-07-06
2. Гиш Р.А. Амарант – культура будущего // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 181. С. 83–92. DOI: 10.21515/1990-4665-181-008
3. Егорова Е.Ю., Резниченко И.Ю., Бочкарев М.С., Дорн Г.А. Разработка новых кондитерских изделий с использованием нетрадиционного сырья // Техника и технология пищевых производств. 2014. № 3 (34). С. 31–38.
4. Пендюрин Е.А., Здоровцов В.А., Рыбина С.Ю., Святченко А.В. Агрохимические характеристики зоокомпоста личинок насекомого черная львинка // Агрохимический вестник. 2024. № 3. С. 59–62. DOI: 10.24412/1029-2551-2024-3-010
5. Пендюрин Е.А., Рыбина С.Ю., Смоленская Л.М. Использование зоокомпоста черной львинки в качестве органического удобрения // Аграрная наука. 2020. № 7–8. С. 106–110. DOI: 10.32634/0869-8155-2020-340-7-106-110
6. Пухальский Я.В., Лоскутов С.И., Сидорова В.Р., Якубовская А.И., Мещеряков Д.Д., Каменева И.А. Использование гермикомпоста *Hermetia illucens* в технологии выращивания микрозелени бобовых культур // Аграрная наука. 2024. № 4. С. 101–107. DOI: 10.32634/0869-8155-2024-381-4-101-107
7. Соколова Д.В., Соловьева А.Е., Зарецкий А.М., Шеленга Т.В. Потенциал коллекции амаранта ВИР в свете мировых тенденций использования и селекции // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2024. № 28 (7). С. 731–743. DOI: 10.18699/vjgb-24-81
8. Урубков С.А., Хованская С.С., Дремина Н.В., Смирнов С.О. Анализ химического состава и пищевой ценности зернового сырья для производства продуктов детского питания // Пищевая промышленность. 2018. № 8. С. 16–21.
9. Caselato-Sousa V.M., Amaya-Farfán J. State of knowledge on amaranth grain: a comprehensive review // Journal of Food Science. 2012. Vol. 77 (4). P. 93–104. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2012.02645.x
10. Chitale M., Palakodety S., Kihara D. Quantification of protein group coherence and pathway assignment using functional association // BMC Bioinformatics. 2011. Vol. 19(12). P. 373. DOI: 10.1186/1471-2105-12-373
11. Kaur N., Kaur S., Agarwal A., Sabharwal M., Tripathi A.D. Amaranthus crop for food security and sustainable food systems // Planta. 2024. Vol. 260 (3). Article 59. DOI: 10.1007/s00425-024-04490-3
12. Li P., Liu C., Luo Y., Shi H., Li Q., PinChu C., Li X., Yang J., Fan W. Oxalate in Plants: Metabolism, Function, Regulation, and Application // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2022. Vol. 70(51). P. 16037–16049. DOI: 10.1021/acs.jafc.2c04787
13. Procopet O., Oroian M. Amaranth Seed Polyphenol, Fatty Acid and Amino Acid Profile // Applied Sciences. 2022. Vol. 12 (4). Article 2181. DOI: 10.3390/app12042181
14. Romano N., Fischer H., Powell A., Sinha A.K., Islam S., Deb U., Francis S. Applications of Black Solider Fly (*Hermetia illucens*) Larvae Frass on Sweetpotato Slip Production, Mineral Content and Benefit-Cost Analysis // Agronomy. 2022b. Vol. 12(4). Article 928. DOI: 10.3390/agronomy12040928
15. Romano N., Powell A., Islam S., Fischer H., Renukdas N., Sinha A.K., Francis S. Supplementing aquaponics with black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae frass tea: effects on the production and composition of sweet potato slips and sweet banana peppers // Aquaculture. 2022a. Vol. 555. Article 738160. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2022.738160
16. Skwaryło-Bednarz B., Stępniak P.M., Jamiołkowska A., Kopacki M., Krzepiłko A., Klikocka H. Amaranth seeds as a source of nutrients and bioactive substances in human diet // Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus. 2020. Vol. 19(6). P. 153–164. DOI: 10.24326/asphc.2020.6.13
17. Toscano S., Cavallaro V., Ferrante A., Romano D., Patané C. Effects of Different Light Spectra on Final Biomass Production and Nutritional Quality of Two Microgreens // Plants. 2021. № 10. Article 1584. DOI: 10.3390/plants10081584
18. Zayed A., Adly G.M., Farag, M.A. Management Strategies for the Anti-nutrient Oxalic Acid in Foods: A Comprehensive Overview of Its Dietary Sources, Roles, Metabolism, and Processing // Food and Bioprocess Technology. 2025. Vol. 18. P. 4280–4300. DOI: 10.1007/s11947-024-03726-0

References

1. Azizov I.K., Akhmadova G.A. Aminokislotnyi sostav semyan amaranta khvostatogo, proizrastayushchego v Uzbekistane [Amino acid composition of amaranth seeds grown in Uzbekistan] // Farmatsiya. 2021. № 7. S. 37–40. DOI: 10/29296/25419218-2021-07-06
2. Gish R.A. Amarant – kul'tura budushchego [Amaranth is the crop of the future] // Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022. № 181. S. 83–92. DOI: 10.21515/1990-4665-181-008
3. Egorova E.Yu., Reznichenko I.Yu., Bochkarev M.S., Dorn G.A. Razrabotka novykh konditerskikh izdelii s ispol'zovaniem netraditsionnogo syr'ya [Development of new confectionery products using non-traditional raw materials] // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. 2014. № 3(34). S. 31–38.

4. Pendyurin E.A., Zdorovtsov V.A., Rybina S.Yu., Svyatchenko A.V. Agrokhimicheskie kharakteristiki zookomposta lichinok nasekomogo chernaya l'vinka [Agrochemical characteristics of zoocompost of black lion fly larvae] // Agrokhimicheskii vestnik. 2024. № 3. S. 59–62. DOI: 10.24412/1029-2551-2024-3-010
5. Pendyurin E.A., Rybina S.Yu., Smolenskaya L.M. Ispol'zovanie zookomposta chernoi l'vinki v kachestve organicheskogo udobreniya [Use of zoocompost of black lion fly larvae as an organic fertilizer] // Agrarnaya nauka. 2020. № 7–8. S. 106–110. DOI: 10.32634/0869-8155- 2020-340-7-106-110
6. Pukhal'skii Ya.V., Loskutov S.I., Sidorova V.R., Yakubovskaya A.I., Meshcheryakov D.D., Kameneva I.A. Ispol'zovanie germikomposta *Hermetia illucens* v tekhnologii vyrashchivaniya mikrozeleni bobovykh kul'tur [Use of hermicompost of *Hermetia illucens* in legume microgreens cultivation] // Agrarnaya nauka. 2024. № 4. S. 101–107. DOI: 10.32634/0869-8155-2024-381-4-101-107
7. Sokolova D.V., Solov'eva A.E., Zaretskii A.M., Shelenga T.V. Potentsial kollektsii amaranta VIR v svete mirovykh tendentsii ispol'zovaniya i selektsii [Potential of the VIR amaranth collection according to the global trends in use and breeding] // Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii. 2024. № 28(7). S. 731–743. DOI: 10.18699/vjgb-24-81
8. Urubkov S.A., Khovanskaya S.S., Dremina N.V., Smirnov S.O. Analiz khimicheskogo sostava i pishchevoi tsennosti zernovogo syr'ya dlya proizvodstva produktov detskogo pitaniya [Analysis of the chemical composition and nutritional value of grain raw materials to produce baby food] // Pishchevaya promyshlennost'. 2018. № 8. S. 16–21.
9. Caselato-Sousa V.M., Amaya-Farfán J. State of knowledge on amaranth grain: a comprehensive review // Journal of Food Science. 2012. Vol. 77(4). P. 93–104. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2012.02645.x
10. Chitale M., Palakodety S., Kihara D. Quantification of protein group coherence and pathway assignment using functional association // BMC Bioinformatics. 2011. Vol. 19(12). P. 373. DOI: 10.1186/1471-2105-12-373.
11. Kaur N., Kaur S., Agarwal A., Sabharwal M., Tripathi A.D. Amaranthus crop for food security and sustainable food systems // Planta. 2024. Vol. 260 (3). P. 59. DOI: 10.1007/s00425-024-04490-3
12. Li P., Liu C., Luo Y., Shi H., Li Q., PinChu C., Li X., Yang J., Fan W. Oxalate in Plants: Metabolism, Function, Regulation, and Application // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2022. Vol. 70(51). P. 16037–16049. DOI: 10.1021/acs.jafc.2c04787
13. Procopet O., Oroian M. Amaranth Seed Polyphenol, Fatty Acid and Amino Acid Profile // Applied Sciences. 2022. Vol. 12 (4). Article 2181. DOI: 10.3390/app12042181
14. Romano N., Fischer H., Powell A., Sinha A.K., Islam S., Deb U., Francis S. Applications of Black Solider Fly (*Hermetia illucens*) Larvae Frass on Sweetpotato Slip Production, Mineral Content and Benefit-Cost Analysis // Agronomy. 2022b. Vol. 12 (4). Article 928. DOI: 10.3390/agronomy12040928
15. Romano N., Powell A., Islam S., Fischer H., Renukdas N., Sinha A.K., Francis S. Supplementing aquaponics with black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae frass tea: effects on the production and composition of sweet potato slips and sweet banana peppers // Aquaculture. 2022a. Vol. 555. Article 738160. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2022.738160
16. Skwaryło-Bednarz B., Stępniak P.M., Jamiołkowska A., Kopacki M., Krzepiłko A., Klikocka H. Amaranth seeds as a source of nutrients and bioactive substances in human diet // Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus. 2020. Vol. 19(6). P. 153–164. DOI: 10.24326/asphc.2020.6.13
17. Toscano S., Cavallaro V., Ferrante A., Romano D., Patané C. Effects of Different Light Spectra on Final Biomass Production and Nutritional Quality of Two Microgreens // Plants. 2021. № 10. Article 1584. DOI: 10.3390/plants10081584
18. Zayed A., Adly G.M., Farag, M.A. Management Strategies for the Anti-nutrient Oxalic Acid in Foods: A Comprehensive Overview of Its Dietary Sources, Roles, Metabolism, and Processing // Food and Bioprocess Technology. 2025. Vol. 18. P. 4280–4300. DOI: 10.1007/s11947-024-03726-0

Поступила: 19.05.25; доработана после рецензирования: 12.07.25; принята к публикации: 21.07.25.

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. Лоскутов С.И., Пухальский Я.В. – концептуализация исследований, сбор данных, проведение эксперимента, подготовка черновика рукописи; Астафьева О.В. – проведение биохимического анализа; Воробьев Н.И. – сбор и анализ данных и их интерпретация; Осипов А.И., Якубовская А.И., Турковская В.Р., Каменева И.А., Космин В.В., Сакович М.П. – правка черновика рукописи, подготовка итоговой версии статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.