

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-440-449>



Поступила 08.10.2024

Поступила после рецензирования 25.09.2025

Принята в печать 29.09.2025

© Лоскутов С. И., Пухальский Я. В., Чукаева М. А., Воробьев Н. И., Виноградов З. С.,
Осипов А. И., Митюков А. С., Тютюма Н. В., Бондаренко А. Н., Ситнов В. Ю., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Open access

ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ЭКСТРАКТОВ НА РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ГУАРА (*CYAMOPSIS TETRAGONOLOBA* (L) TAUB) В УСЛОВИЯХ ЗАКРЫТОГО ГРУНТА

Лоскутов С. И.¹, Пухальский Я. В.^{1*}, Чукаева М. А.², Воробьев Н. И.³, Виноградов З. С.⁴,
Осипов А. И.⁵, Митюков А. С.⁶, Тютюма Н. В.⁷, Бондаренко А. Н.⁷, Ситнов В. Ю.¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский Горный Университет Императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии,
Санкт-Петербург — Пушкин, Россия

⁴Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова,
Санкт-Петербург, Россия

⁵Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

⁶Институт озерадения Российской академии наук — обособленное структурное подразделение
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

⁷Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук,
с. Солёное Займище, Астраханская обл., Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

Cyamopsis tetragonoloba,
зоогумус,
фульвокислоты,
морфологические
показатели,
элементный профиль,
вычислительная
нейросеть

Гуар (*Cyamopsis tetragonoloba*) является ценной культурой, которую выращивают для получения камеди, используемой в пищевой промышленности. Биомасса гуара может применяться при кормлении животных. При этом по питательной ценности гуар не уступает соевому шроту. Главными критериями в выборе сорта гуара являются: скорость роста растений, выращенная биомасса растений и их питательная ценность. При выращивании гуара в условиях искусственного и закрытого грунта особое внимание должно уделяться органоминеральной удобрительной системе. В данной работе исследовалось влияние вытяжки из зоогумуса (ЗГ), производимого мухой черная львинка (*Hermetia illucens* Linnaeus) при переработке пищевых органических отходов, и фульвокислотной вытяжки (ФК) из озерного сапропеля на растения гуара. Было исследовано влияние трех типов органоминеральных удобрений на семь сортов гуара, взятых из коллекций ФГБНУ «Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН», ВИР им. Н. И. Вавилова. Растения выращивали при регулируемом освещении и в условиях закрытого искусственного грунта. В контроле использовался минеральный раствор NPK Хогланда. В вариантах с применением органических удобрений доза раствора NPK Хогланда уменьшалась в 4 раза. По окончании 20-дневного опыта были измерены биометрические показатели и профили химических элементов в растениях. Профили химических элементов обрабатывались авторской вычислительной нейросетевой программой, которая рассчитывает безразмерный индекс когнитивной значимости CSI = 0...10 (Cognitive Salience Index), представляющий уровень фрактальной композиции химических элементов в растениях и скорость масс-накопительных биохимических процессов в них. Наибольшие значения индекса CSI отмечены в растениях гуара сортов Победа-17 и Авангард, выращенных при NPK + ФК. Растения гуара сорта Находка продемонстрировали наибольшую скорость масс-накопительных процессов при NPK + ЗГ. Это подтверждает целесообразность частичной замены минеральных удобрений органическими добавками.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FGUS2024-0010 и № FGUS2025-0005 ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

Received 08.10.2024

Accepted in revised 25.09.2025

Accepted for publication 29.09.2025

© Loskutov S. I., Puhalsky J. V., Chukaeva M. A., Vorobiev N. I., Vinogradov Z. S.,
Osipov A. I., Mityukov A. S., Tyutyuma N. V., Bondarenko A. N., Sitnov V. Yu., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

EFFECT OF ORGANIC EXTRACTS ON GROWTH OF GUAR PLANTS (*CYAMOPSIS TETRAGONOLOBA* (L) TAUB) IN CLOSED GROUND CONDITIONS

Svyatoslav I. Loskutov¹, Yan V. Puhalsky¹, * Maria A. Chukaeva², Nikolay I. Vorobyov³,
Zosim S. Vinogradov⁴, Anatoly I. Osipov⁵, Aleksey S. Mityukov⁶, Natalia V. Tyutyuma⁷,
Anastasia N. Bondarenko⁷, Veniamin Yu. Sitnov¹

¹All-Russian Research Institute of Food Additives, Saint Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

³All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, Saint Petersburg, Russia

⁴Federal Research Center the N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Saint Petersburg, Russia

⁵Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg, Russia

⁶Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

⁷Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, village Solenoe Zaimishche Astrakhan region, Russia

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лоскутов, С. И., Пухальский, Я. В., Чукаева, М. А., Воробьев, Н. И., Виноградов, З. С., Осипов, А. И. и др. (2025). Влияние органических экстрактов на развитие растений гуара (*Cyamopsis tetragonoloba* (L) taub) в условиях закрытого грунта. *Пищевые системы*, 8(3), 440–449. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-440-449>

FOR CITATION: Loskutov, S. I., Puhalsky, J. V., Chukaeva, M. A., Vorobiev, N. I., Vinogradov, Z. S., Osipov, A. I. et al. (2025). Effect of organic extracts on growth of guar plants (*Cyamopsis tetragonoloba* (L) Taub) in closed ground conditions. *Food Systems*, 8(3), 440–449. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-440-449>

KEY WORDS:

Cyamopsis tetragonoloba, zoohumus, fulvic acids, morphological indicators, elemental profile, computational neural network

ABSTRACT

Guar (*Cyamopsis tetragonoloba*) is a valuable crop grown to produce gum used in the food industry. At the same time, guar biomass can be used to feed animals. Guar is not inferior to soybean oil meal in nutritional value. The main criteria for choosing a guar variety are: plant growth rate, grown plant biomass and their nutritional value. When growing guar in artificial and closed ground, special attention should be paid to the organomineral fertilization system. In this paper, we studied an effect of zoohumus extract (ZG) produced by the Black Soldier fly (*Hermetia illucens* Linnaeus) during the processing of food organic waste, and fulvic acid extract (FA) from lake sapropel on guar plants. An effect of three types of organomineral fertilizers on seven guar varieties taken from the collections of the Caspian Agrarian Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences and the N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR) was studied. The plants were grown under controlled lighting and in closed artificial soil conditions. The control used a mineral solution of Hoagland's NPK. In the variants with the use of organic fertilizers, the dose of Hoagland's NPK solution was reduced by 4 times. At the end of the 20-day experiment, biometric indicators and profiles of chemical elements in the plants were measured. The profiles of chemical elements were processed by the authors' computational neural network program, which calculates the dimensionless index of cognitive significance CSI = 0...10 (Cognitive Salience Index), representing the level of fractal composition of chemical elements in plants and the rate of mass-accumulative biochemical processes in them. The highest CSI values were observed in guar plants of the Pobeda-17 and Avangard varieties grown with NPK + FA. Guar plants of the Nakhodka variety demonstrated the highest rate of mass accumulation processes with NPK+ZG. This confirms the feasibility of partial replacement of mineral fertilizers with organic additives.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS2024-0010 and No. FGUS2025-0005 of the state assignment of the V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS.

1. Введение

Гуар (*Cyamopsis tetragonoloba*) — это кустистое однолетнее растение, относящиеся к семейству бобовых (*Fabaceae*) [1]. Эту культуру в основном выращивают в Индии и Пакистане, чтобы получить стручки и семена для использования их в рационе животных, или как овощную и кормовую добавку к популярному кормовому соевому шроту [2–5]. Из эндосперма семян экстрагируют вязкий коллоидный раствор — гуаровую камедь, или гуаран [6]. Гуаран представляет собой полисахарид-галактоманнан, который используется в качестве загустителя и стабилизатора (E412) в пищевой промышленности [7–10]. По химическому составу гуаровая мука подобна камеди рожкового дерева (пищевой добавке E410). В перспективе высококонцентрированные белковые субстраты из гуара могут в дальнейшем заменить сою и пшеницу [11] и стать недорогим агропромышленным сырьем для производства инновационных продуктов для здорового питания человека. Листья гуара можно даже использовать как зеленую приправу в вегетарианском меню.

Для управления режимом питания растений и снижения накопления в них нитратов, поступающих из минеральных удобрений, в мировой практике земледелия стали применяться органоминеральные удобрения, в которых доля синтетической составляющей уменьшена за счет органических добавок. Данная удобрительная система не уступает по эффективности минеральной и способна обеспечивать растения всеми необходимыми эссенциальными элементами. Тем самым снижаются затраты на производство и повышаются экологические показатели качества конечного продукта. Ранее было установлено, что в состав органоминеральных удобрений при возделывании гуара могут включаться вытяжки гуминовых кислот [12–14], полученные из биогуруса и навоза КРС [15–17]. При этом в литературе недостаточно сведений об использовании вытяжек из зоогуруса как нового типа органических удобрений, получаемого путем биоконверсии пищевых отходов личинками синантропной мухи, черная львинка (*Hermetia illucens* Linnaeus, 1758) [18,19]. Известен единичный полевой опыт, проведенный в Индии (Хайдарабад, штат Телингана) [20].

Агрохимический анализ исходного сырья показал, что состав экскрементов насекомых соответствует стандартам качества, установленным ГОСТ 33830-2016¹ и ГОСТ Р 53117-2008² для органических удобрений, полученных в результате переработки органических отходов животноводства [21–23]. По содержанию биогенных элементов зоогурус не уступает птичьему помету и вермикомпосту, с которыми его также можно сочетать при формировании смешанной органической удобрительной добавки [24]. Установлено, что в зоогурусе *H. illucens* концентрация азота (20–130%), фосфора (60–80%) и калия (17–193%) была больше по сравнению с экскрементами других насекомых, в частности ширтоцерки (*Schistocerca gregaria*), тутового шелкопряда (*Bombyx mori*), полевого сверчка (*Scaphisoma icipe*) и мучного хрущака (*Tenebrio molitor*) [25]. Общее содержание элементов варьирует от 0,8 до 5,1% для азота, от 0,8 до 2,5% для фосфора и от 0,2 до 4,1% для калия соответственно [26,27]. Соотно-

шение N:P₂O₅:K₂O в удобрении составляет примерно 1:0,9:1,1 [28]. Основной формой азота является мочевиная кислота, метаболизирующая до аммония (NH₄⁺) и аммиака (NH₃), обладающих летучестью [29]. Низкое соотношение C:N в экскрементах относительно исходного субстрата обеспечивает высокую доступность элементов питания для растений [27,30,31]. По питательной ценности зоогурус сопоставим с аммиачной селитрой (NH₄NO₃) и может служить ее органической заменой [32]. Зоогурус не аккумулирует токсичные металлы, микотоксины или инсектициды [19,27,31]. Содержание органического вещества достигает 84,9%, что превышает таковое в навозе и в традиционных компостах [28]. Минеральная фракция богата не только макро-, но и эссенциальными микроэлементами. Однако содержание последних варьирует в зависимости от выбора рациона кормления личинок [19,26,33,34]. Микробиота зоогуруса представлена преимущественно сапрофитными микроорганизмами кишечника насекомых, до 80% которых составляют бактерии рода *Bacillus*, секретирующих фитогормоны [35]. Также они продуцируют антимикробные пептиды [36–40], благодаря чему зоогурус способен проявлять фунгицидные свойства [41]. Это особенно важно при выращивании сельскохозяйственных культур в тепличных условиях закрытого грунта, где борьба с фитопатогенными грибами весьма актуальна. Среди других полезных бактерий в составе зоогуруса были обнаружены *Sporosarcina* spp., *Corynebacterium* spp., *Lactobacillus* spp., *Actinobacteria* spp. и *Pseudomonas* spp [42].

Согласно литературному источнику [43], у зоогуруса имеется еще одно полезное качество для агрономии. Как компонент торфосмеси он способен улучшать физико-механические свойства субстрата и усиливать его влагоемкость. Такое свойство можно считать удачным при выращивании засухоустойчивых культур, которым является и гуар.

Идея использования экскрементов насекомых в качестве органического удобрения появилась относительно недавно. Однако в связи со значительным ростом производства данного сырья (до 3,4–3,9 млрд долл. к 2030 г) [42] популярность зоогуруса будет также увеличиваться.

В схему удобрительных добавок целесообразно включать также фульвокислотные вытяжки из озерных отложений — еще один тип физиологически активных соединений органической природы, оказывающих стимулирующее действие на рост и развитие растений [44–47]. Кроме того, они проявляют антифунгальное действие на фитопатогены [48]. Фульвокислоты не являются удобрением в традиционном понимании, а выступают в роли эффективных биостимуляторов и иммуномодуляторов. Их основной механизм действия включает усиление проницаемости плазмолемм и, что наиболее значимо, хелатирование биогенных элементов с образованием подвижных комплексов. Это обеспечивает повышенную доступность и усвояемость питательных веществ корневой системой даже при их низкой концентрации в среде и при ограниченном содержании самих фульвокислот. Следствием является оптимизация питания растений, их адаптация к обедненным субстратам и снижение риска потери урожая.

Большинство биохимических исследований сосредоточено на изучении влияния удобрительных технологий для получения семенного материала и зеленой биомассы уже взрослых растений [49–55].

¹ ГОСТ 33830-2016 «Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2020. — 17 с.

² ГОСТ Р 53117-2008 «Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2020. — 18 с.

Работ по изучению влияния различных органических добавок на изменение режима питания гуара на раннем этапе их роста при этом не обнаружено. Последнее важно для первичного скрининга перспективных сортов и диагностики усвоения ими эссенциальных элементов на первичной фазе вегетации. Ответные реакции молодых (ювенильных) растений, как правило, определяют весь дальнейший цикл развития культуры и ее адаптационный потенциал в отношении устойчивости к различным стрессам.

В ювенильный период развития растений процессы формирования их органов контролируются на молекулярно-генетическом уровне и характеризуются сортоспецифичностью. Интенсивность их масс-накопительных процессов в основном зависит от объема биохимических веществ, поступающих в растения, и от скорости перемещения этих веществ по внутренним сосудам растений в составе питательных растворов. Чем больше биохимических веществ поступает в растения в единицу времени, тем быстрее формируются их органы и нарастает биомасса. Очевидно, что органоминеральные удобрения для растений должны содержать достаточное количество биохимических элементов в своем составе. Если хотя бы одного из химических элементов в составе удобрений будет недостаточно, растение будет развиваться неполноценно, что приведет к снижению качества и количества урожая.

На волне очередной информационно-коммуникационной революции (Индустрия 4.0), начавшейся в России, и на фоне развития методов биоинформатики все большее число исследователей прибегает к разработке нейросетей как мощного математического инструментария для анализа больших массивов (Big Data) эмпирических данных. В области физиологии растений это особенно актуально, поскольку на любом этапе роста нейросети позволяют быстро и эффективно обрабатывать данные и количественно оценивать когерентность внутреннего состояния (гомеостаза) растительной системы. Это имеет большое значение при изучении отзывчивости культур на новые типы органических удобрений.

Таким образом, цель настоящей работы связана с проведением нейросетевой оценки изменения связи масс-накопительных процессов с биохимическими параметрами молодых побегов гуара. Оценка проводилась под влиянием внесения в субстрат различных органических добавок в виде экстрактов, полученных из зоогумуса и фульвокислот.

2. Объекты и методы

Растения гуара выращивали в течение 20 суток в закрытом грубоксе при полной светокультуре (Рисунок 1). Температура воздуха

внутри рабочей зоны поддерживалась на уровнях 28 °С днем и 22 °С ночью. Влажность воздуха была в пределах 60–70 %. Источником освещения служил LED-светильник полного белого спектра с возможностью диммирования Zeus Pro 600W (Lumatek, Великобритания). Интенсивность света с высоты подвеса 1,2 м составила 36800 Лк (551,7 ммоль/м²/с), фотопериод 16ч/8ч (день/ночь). Замеры инсоляции проводили с использованием спектрофотометра «Спектр» (ООО НКТ, Россия) и люксметра LX-1108 (Votcraft, Германия). Эксперимент повторяли двукратно.

Для проведения опыта было взято семь сортов гуара (Таблица 1) из коллекций Прикаспийского аграрного федерального научного центра РАН и Федерального исследовательского центра Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова. Характеристика всех сортов приведена в Таблице 1.

Перед посевом семена гуара стерилизовали 5-процентным раствором гипохлорита натрия в течение 5 минут, после чего семена трижды тщательно промывали дистиллированной водой по стандартной методике [56].

Семена растений гуара высаживали по отдельности в каждую ячейку кассеты, содержащей 18 ячеек. Кассеты были заполнены нейтрализованным кокосовым субстратом, характеристика которого представлена в Таблице 2 [57]. После посева семян кассеты с растениями были выставлены в грубокс.

В качестве удобрительного минерального раствора (NPK) использовали раствор Хогланда, приготовленный согласно рекомендации разработчика. Варианты с растениями, удобренными только раствором NPK, в исследовании рассматривались как контрольные. В опытных вариантах объемная доза удобрительного раствора NPK уменьшалась в 4 раза, а органические добавки вносились в компенсирующем объеме: 1,0 % вытяжка из зоогумуса (ЗГ) и 0,05 % экстракт фульвокислот (ФК) из озерного сапропеля.

Личинок *H. illucens* для получения сухих экскрементов разводили на базе лабораторного инсектария Всероссийского научно-исследовательского института пищевых добавок. Вытяжку фульвокислот (действующее вещество 19,2 %) получали путем кислотной экстракции из ультрадисперсной суспензии сапропеля (Псковская область, Россия), полученного в Институте озероведения РАН.

Минеральные и органоминеральные удобрения вносились в искусственный почвенный субстрат разово при посеве семян. Далее влажность почвенного субстрата везде поддерживали поливом фильтрованной водой. Элементный состав применяемых удобрений приведен в Таблице 3.

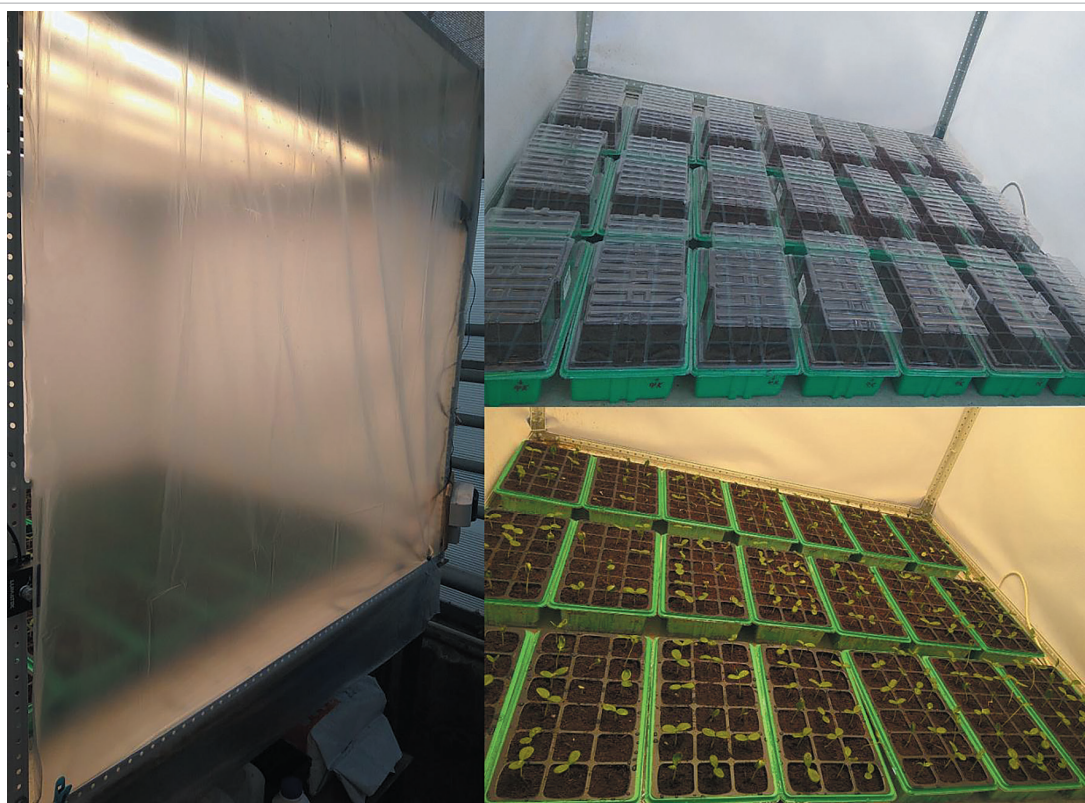


Рисунок 1. Внешний вид постановки опыта по выращиванию гуара в закрытом грубоксе

Figure 1. Photographs of the experimental setting for growing guar in the closed grow box

Таблица 1. Характеристика сортов гуара, используемых в работе
Table 1. Characteristics of the guar varieties used in the study

Сорт	Год урожая	Место репродукции	Содержание белка, %	Вегетационный период, дней	Описание
Авангард	2020	Астрахань	26,0	120	Среднеспелый ветвистый
Находка	2021	Кубань	30,0	89	Раннеспелый слабоветвистый
W15	2021	Астрахань	31,0	110	Раннеспелый одностебельный
Крымский	2021	Астрахань	31,0	110	Раннеспелый слабоветвистый
Вир-21	2021	Кубань	31,0	109	Раннеспелый одностебельный
Победа 17	2020	Астрахань	31,0	120	Среднеспелый слабоветвистый
Победа 11	2021	Астрахань	31,0	110	Раннеспелый одностебельный

Таблица 2. Физико-химическая характеристика кокосового субстрата, используемого для выращивания гуара в контролируемой среде

Table 2. Physico-chemical characteristics of the coconut substrate used for growing guar in the controlled environment

Физико-химические параметры	Значения
Плотность, кг/м ³	115,0
Водоудерживающая способность, %	64,0
Электропроводность, мСм/см	880,0
pH _{KCl}	5,5
Степень минерализации волокна, ppm	400,0
NO ₃ , г/кг сухого вещества	2,6
NH ₄ , г/кг сухого вещества	1,7
P, г/кг сухого веществ	1,7
K, г/кг сухого вещества	80,4
Ca, г/кг сухого вещества	16,7
Mg, г/кг сухого вещества	5,7
S, г/кг сухого вещества	1,1
Na, г/кг сухого вещества	19,8
Cl, г/кг сухого вещества	77,5

Таблица 3. Средние показатели элементного профиля удобрений, используемых в опыте

Table 3. Average indicators of the elemental profile of fertilizers used in the experiment

Элемент	Содержание, мг/л		
	Раствор Хогланда	1,0% экстракт зоогумуса <i>H. Illucens</i>	0,05% раствор фульвокислот
Азот	210,0	150,0	0,5
Фосфор	31,0	72,1	0,05
Калий	235,0	137,0	0,5
Железо	2,5	1,1	2,0
Марганец	0,5	0,8	0,003
Бор	0,5	0,1	0,002
Молибден	0,01	0,01	0,003
Медь	0,02	0,04	0,009
Цинк	0,05	0,01	0,002
Кальций	200	136,0	1,0
Натрий	0,01	3,7	0,31
Магний	48,0	40,0	0,2
Сера	64,0	77,7	0,5

По окончании опыта измеряли высоту и массу каждого растения во всех вариантах. Также проводили анализ содержания химических элементов в зеленых побегах растений гуара. Для этого полученную растительную биомассу высушивали и измельчали до состояния пудры в агатовой ступке. Во фторопластовые сосуды отбирали наве-

ски по 0,2 г, добавляли по 5 мл концентрированной азотной кислоты и по 2 мл перекиси водорода, сосуды прикрывали часовыми стеклами и оставляли на час. После этого проводили мокрое озоление в системе микроволнового разложения Multiwave 3000 solv (Anton Paar, Австрия) по стандартной методике [58,59] согласно программе, представленной в Таблице 4.

Таблица 4. Программа микроволнового разложения растительных проб

Table 4. Program of microwave decomposition of plant samples

Шаг	1	2	3
Температура, °C	135	150	190
Давление, бар	60	60	60
Мощность, Вт	650	700	900
Время нагрева, мин	5	5	5
Время выдержки, мин	5	10	10

После остывания верхний супернатант без осадка с полученных растворов количественно переносили в мерные полиэтиленовые сосуды и доводили до метки 20 мл деионизированной водой. Для всех образцов велись две параллельные пробы, а также готовился холостой раствор. Применяемые реактивы имели квалификацию о. с. ч., а азотная кислота дополнительно была предварительно очищена в системе субпергонки кислот subCLEAN (Milestone, США) для уменьшения концентраций элементов в холостой пробе.

Полученные растворы анализировались методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ICPE-9000 (Shimadzu, Япония) [60,61]. Для каждого элемента строилась градуировочная характеристика (коэффициент корреляции в каждом случае $R > 0,998$). В качестве стандартного раствора использовался многоэлементный раствор для ICP Sigma-Aldrich Merck.

Статистическую обработку с первичной оценкой коэффициента корреляции элементов по методу Пирсона проводили с помощью вычислительной программы Statistica v 10.0 (StatSoft Inc., США).

Результативность и скорость биохимических процессов, протекающих в растениях гуара, оценивались по величине безразмерного индекса когнитивной значимости CSI = 0...10 (Cognitive Salience Index) [62], который вычислялся с помощью авторской нейросетевой Excel-программы³ (Рисунок 2).

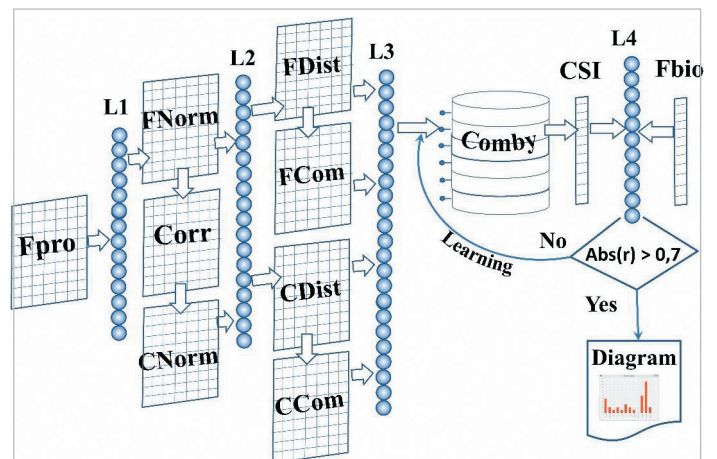


Рисунок 2. Функциональная схема нейросетевой программы, вычисляющей индекс CSI. Learning — цикл обучения-поиска корректного вычисления индекса CSI, с использованием алгоритмов из базы Comby. L1-L4 — слои искусственных нейронов, выполняющих преобразование матриц. Diagram — графическая диаграмма, представляющая значения индекса CSI в вариантах опыта

Figure 2. Functional scheme of the neural network program that calculates the CSI index. Learning — the learning-search cycle of correct calculation of the CSI index using algorithms from the Comby base. L1-L4 — layers of artificial neurons performing matrix transformation. Diagram — the diagram presenting the values of the CSI index in the variants of the experiment

³ Лоскутов, С. И., Воробьев, Н. И., Пухальский, Я. В. Нейросетевая программа для экологической экспертизы условий развития цветочно-декоративных растений «Нейроцвет Н1» / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 20246669033 от 13.08.2024. Заявка № 2024667596 от 22 июля 2024 ГАОУ ВО Ленинградской области ЛГУ им. А. С. Пушкина.

Программа была настроена и обучена преобразовывать методом «многие-к-одному» профили химических элементов растений гуара в индекс CSI. При этом учитывалось, что индекс CSI, с одной стороны, является продуктом преобразования профилей химических элементов в растениях, а с другой — отражает уровень фрактальной композиции химических элементов в растениях и интенсивность биохимических масс-накопительных процессов в растениях. По нашему предположению, фрактальная композиция химических элементов в растениях соответствует самому высокому уровню самоорганизации микробно-растительной биосистемы растений гуара и демонстрирует наиболее согласованное взаимодействие ризосферных микроорганизмов и растений. Вследствие этого происходит интенсивное и полноценное развитие растений. Таким образом, представляется возможность по значению индекса CSI выбирать наилучшие удобрительные агротехнологии, обеспечивающие максимально быстрое развитие растений гуара.

Нейросетевой программой выполняются следующие матричные преобразования по формулам:

$$FNorm = Normalization(Fpro), \quad (1)$$

$$Corr = Correlation(FNorm), \quad (2)$$

$$CNorm = Normalization(Corr \times FNorm), \quad (3)$$

$$FDist = EuclidDistance(FNorm), \quad (4)$$

$$CDist = EuclidDistance(CNorm), \quad (5)$$

$$FCom = EigenVectors(FDist), \quad (6)$$

$$CCom = EigenVectors(CDist), \quad (7)$$

где: *Fpro* — концентрация химических элементов в растениях по вариантам опыта;

FNorm, *CNorm* — матрицы нормализованных данных матрицы *Fpro* и произведения матриц *FNorm* × *CNorm*;

Corr — матрица коэффициентов корреляции между строками матрицы *FNorm*;

FDist, *CDist* — матрицы евклидовых дистанций между столбцами матриц *FNorm*, *CNorm*, *Fcom*;

FCom — матрицы собственных векторов матриц *FDist*, *CDist*;

FBio — вектор биометрических данных растений по вариантам опыта;

Normalization() — функция построчной нормализации матричных данных;

Correlation() — функция вычисления коэффициентов корреляции между строками матриц;

EuclidDistance() — функция вычисления дистанций между столбцами матриц;

EigenVectors() — функция вычисления собственных векторов матриц.

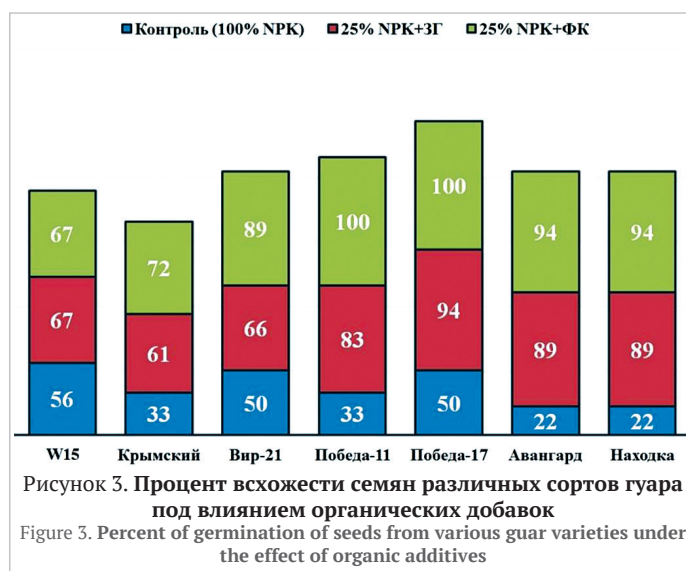
Особенностью нейросетевой программы являлся обязательный этап ее обучения [63–65], при выполнении которого реализуется поиск корректного алгоритма вычисления индекса CSI. Обучение нейросетевой программы становится возможным после активации сервиса Learning (Рисунок 2). Сервис Learning работает в автоматическом режиме и выполняет последовательную выборку из базы Comby алгебраических выражений, а затем по формуле выбранного выражения преобразует данные матриц *FNorm*, *CNorm*, *FDist*, *CDist*, *FCom*, *CCom* в индекс CSI. Циклические вычисления сервиса Learning могут завершиться только в том случае, когда значения индекса CSI достигнут или превысят уровень межвариантной корреляции с биометрическими данными растений $Abs(r) > 0,7$. Для повышения вероятности нахождения корректного алгоритма вычисления индекса CSI с помощью нейросетевой программы число записей в базе Comby увеличено до двух сотен.

С помощью бесплатной онлайн-программы SRplot [66], доступной по веб-серверу <http://www.bioinformatics.com.cn/SRplot>, также был проведен кластерный анализ с построением тепловой карты.

3. Результаты и обсуждение

Все проростки, выращенные на контроле, показали наихудший результат по всхожести (Рисунок 3). Наихудший результат на контроле показали сорта Авангард и Находка. Предпосевное внесение органических добавок в субстрат резко поменяло ситуацию, и данные сорта, наравне с Победой-11 и Победой-17, вышли на лидирующие позиции. Наименьшую всхожесть при органоминеральной удобрительной схеме продемонстрировали сорта W15, Крымский и ВИР-21.

Морфометрический анализ показал, что, несмотря на четырехкратное снижение дозы минеральных удобрений, проростки, выращенные с органическими добавками, существенно превосходили по высоте и биомассе растения контрольного образца. В среднем по сортам прибавка в высоте побегов на зоогумусе составила 17,6%, на фульвокислоте — 24,5% (Рисунок 4). Наилучшую отзывчивость



показали сорта Победа-11, Находка и Авангард. Худший показатель отмечен для сорта W15. Прибавка в высоте у него в среднем при использовании органических добавок составила лишь 5,6%. Оценка полученного веса показала прибавку на 60,5% при внесении зоогумуса и на 55,5% при внесении фульвокислот. Наилучший результат отмечен для сорта Авангард (+111,2%), наихудший — для сорта Находка (+16,6%). По отзывчивости выбранных сортов на воздействие органических удобрений, используемых частично вместо минеральных для экологизации урожая, можно построить следующий убывающий ряд соотношений массы к высоте: Авангард > Победа-17 > Вир-21 > W15 > Победа-11 > Крымский > Находка. Очевидно, что стимулирующий эффект органических добавок в большей степени обусловлен их гормональной активностью, которая дифференцирует режим питания и пролонгированно влияет на метаболизм растительных клеток. Таким образом, растение усваивает не весь комплекс элементов сразу: происходит их перераспределение во временной перспективе. Посредством хелатирования растения избирательно усваивают из обедненного субстрата и внесенного удобрения лишь те элементы, которые необходимы им в большей степени на определенном этапе вегетации.

Проведенный элементный анализ позволил выделить три элемента с повышением процента аккумуляции в зеленой биомассе молодых проростков всех сортов гуара под влиянием органических добавок — бор, калий и марганец (Таблица 5).

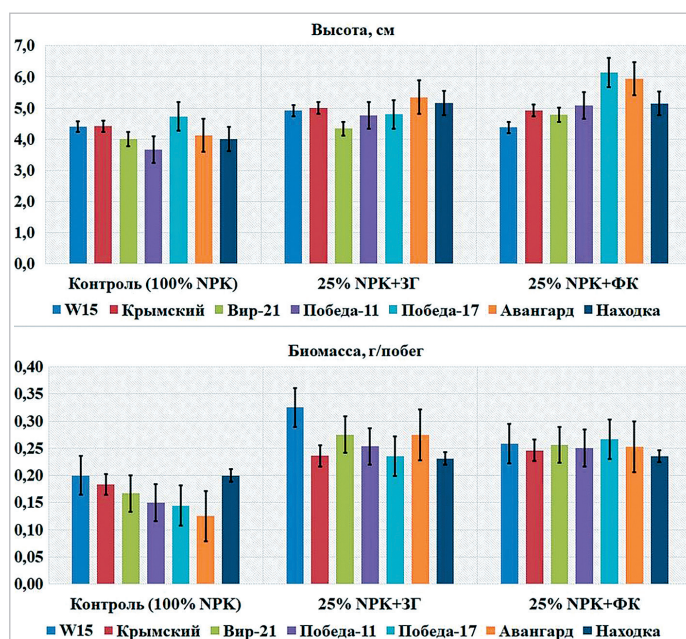


Таблица 5. Содержание элементов в зеленой биомассе побегов различных сортов гуара по вариантам опыта, мг/кг
Table 5. Content of elements in green biomass of sprouts of various guar varieties by the variants of the experiment, mg/kg

Вариант	Ca	P	Mg	Na	K	S	Fe	Zn	B	Ba	Cu	Ni	Mn	Mo	Co	Cr	Sr
Авангард К	1641	7751	2700	4302	42430	3009	130	41	19	1,9	5,8	2,4	24	5,5	1,9	1,4	7,4
Авангард ЗГ	1845	6072	2690	4648	50005	2567	144	35	24	3,1	7,6	4,1	30	5,2	3,8	3,4	7,8
Авангард ФК	1929	5691	2740	2311	51434	3118	129	34	33	2,8	5,3	0,68	35	3,7	0,62	0,82	7,7
W15 К	2002	8670	2625	4085	44379	2915	313	52	22	3,7	11	2,5	27	5,8	1,2	2,2	20
W15 ЗГ	1836	5711	2617	2652	50889	2411	278	38	26	3,7	5,6	2,3	27	4,6	0,81	1,6	16
W15 ФК	1777	6215	2348	2912	44810	3286	223	36	26	3,2	5,4	1,5	30	4,7	0,60	1,1	14
ВИР 21 К	1641	8641	3008	5816	66242	2744	155	49	27	2,5	9,0	1,8	23	4,0	1,7	3,6	12
ВИР 21 ЗГ	1592	5577	2879	2408	52501	2200	137	37	30	2,3	4,5	1,2	24	3,3	0,52	1,2	11
ВИР 21 ФК	1597	5997	2920	1695	47517	2989	148	37	30	2,7	4,5	1,0	28	3,7	0,48	1,0	10
Находка К	1591	7996	2448	3401	33851	2463	182	40	19	2,9	4,9	1,6	17	4,2	1,0	0,61	10
Находка ЗГ	1880	6442	3037	2611	56046	2502	173	41	34	3,1	4,7	2,1	27	3,3	2,3	1,2	9,8
Находка ФК	2091	6258	3027	3096	50929	2891	185	35	29	3,8	3,9	3,0	32	2,9	3,8	1,4	10
Победа-17 К	2063	8284	2716	3483	44918	2895	249	54	22	4,0	9,0	2,2	22	12	1,4	1,6	22
Победа-17 ЗГ	1754	5455	2769	2063	49402	2337	159	43	25	3,7	7,4	0,71	29	6,4	0,32	1,4	15
Победа-17 ФК	1815	6318	3001	1622	55652	3122	140	43	32	2,8	4,8	1,8	38	7,8	1,6	2,2	14
Победа-11 К	1926	7140	2422	3547	28687	2617	206	46	15	4,1	5,8	1,8	19	5,0	1,1	0,80	10
Победа-11 ЗГ	1819	5421	2478	2934	44441	2471	181	36	34	4,2	6,0	0,90	25	3,9	0,31	1,1	11
Победа 11 ФК	2211	6232	2809	2852	43783	3260	221	39	27	4,4	4,1	2,7	31	4,3	1,1	2,2	11
Крымский К	1967	7905	2684	3346	39276	2609	317	42	22	5,8	13	1,5	19	12	1,0	1,1	30
Крымский ЗГ	1618	5859	2624	3024	45479	2220	223	34	24	5,5	7,5	1,0	25	11	0,58	0,92	21
Крымский ФК	2038	6580	2873	2467	49053	3101	220	36	28	4,6	5,7	0,72	32	10	0,42	0,51	21
Среднее	1840	6677	2734	3108	47225	2749	196	40	26	3,6	6,5	1,8	27	5,9	1,3	1,5	14

Примечание: указаны средние значения. Ошибка средних везде составляет не более $\pm 5,0\%$.

Обнаружена умеренная положительная взаимосвязь между основными макроэлементами: К-Р ($r = 0,83$), К-Mg ($r = 0,78$). Это отражает их совместную роль в энергетическом метаболизме (АТФ), синтезе белков и хлорофилла. Также выявлена умеренная отрицательная корреляция между натрием и калием ($r = -0,51$), подтверждающая известный физиологический антагонизм этих элементов при их поглощении и транспорте в растениях.

Проведенный кластерный анализ позволил сгруппировать сорта Победа-11, Победа-17, W15 и Крымский как наиболее отзывчивые по изменению в режиме питания. Сравнение результатов анализа элементного профиля с морфометрической градацией сортов на воздействие органических добавок также позволило выделить бор, марганец и калий на тепловой карте в единый гомогенный ряд совместно с магнием (Рисунок 5).

Калий являлся доминирующим макроэлементом в суммарном пуле нутриентов, составляя долю в 73%. Данное трио элементов является необходимым для нормального роста и развития растений. В частности, бор необходим для ризогенеза и опыления цветков. Кроме того, бор участвует в транспорте других ионов через клеточные мембраны [67]. Его накопление в тканях опосредовано физиологическими и молекулярными связями. Марганец участвует в усвоении углекислого газа при дыхании растений и в процессе фотосинтеза. Он помогает в синтезе хлорофилла, усвоении нитрата и переносе электронов во время фотосинтеза. Также он активирует жиरोобразующие ферменты и участвует в образовании рибофлавина, аскорбиновой кислоты и каротина [68]. Наконец, калий принимает участие в регуляции водного режима растений, в синтезе углеводов, в метаболизме азота и углерода [69,70]. Было обнаружено, что калий обеспечивает устойчивость к абиотическому стрессу. В условиях солевого стресса калий помогает поддерживать ионный гомеостаз и регулировать осмотический баланс в растениях. В условиях засухи калий контролирует открытие/закрытие корневых устьиц, регулирующих движение потоков растворов питательных веществ по сосудам растений, что способствует адаптации растений к условиям дефицита воды в окружающей среде [71].

Ранее была продемонстрирована положительная роль этих элементов, применяемых как по отдельности, так и в комбинации, в виде чистых солей или их гуминовых соединений для накопления сухого вещества и урожайности картофеля (*Solanum tuberosum*) [72–74] и барбариса (*Berberis vulgaris* L.) [75]. Все они способны образовывать хелатные комплексы с аминокислотами, такими как аспарагин, глицин, аланин и серин, которые участвуют в делении клеток и синтезе природных фитогормонов роста, включая ауксины, цитокинины и гиббереллины [76]. Это подтверждает, что повышенное накопле-

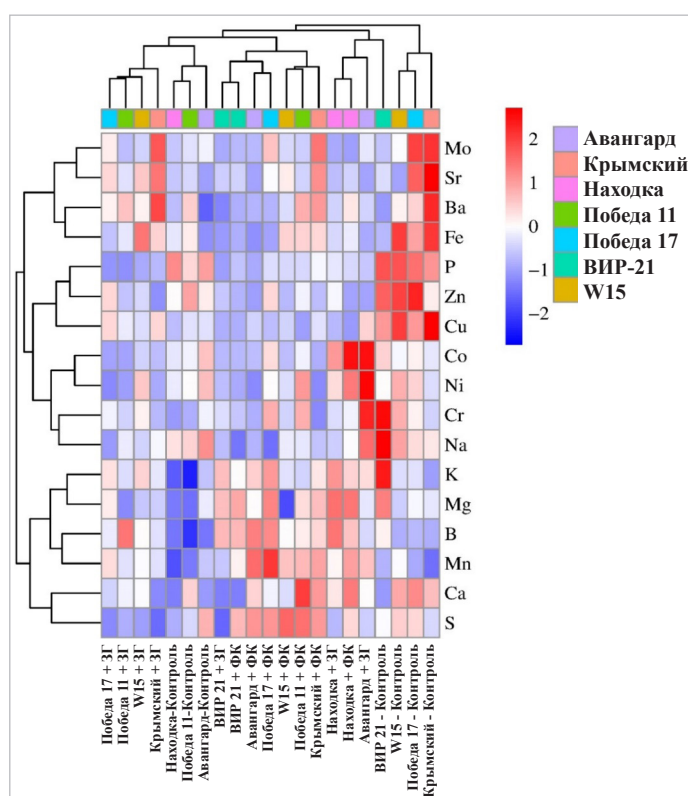


Рисунок 5. Тепловая карта кластерного родства изученных сортов гуара по элементному составу
Figure 5. Heat map of cluster relatedness of the studied guar varieties by the elemental composition

ние этих элементов в побегах может быть связано с присутствием в органических добавках гормоноподобных веществ и указанных аминокислот, которые влияют на иммунную систему растений на ранних стадиях их роста.

Сильные положительные связи между В-К-Mn-Mg ($r = 0,83–0,91$) и морфометрическими показателями свидетельствуют об их совместном участии в метаболических путях, связанных с биосинтезом клеточных стенок и с осморегуляцией.

Чистая фульвокислота увеличивает проницаемость клеточных мембран в большей мере, чем ее вероятное связанное количество в зоогумусе, поэтому у подавляющего числа сортов суммарное накопление пула биогенных элементов в биомассе выше (Рисунок 6). Важно отметить, что у сорта Находка, имеющего наименьший показатель набора массы, наблюдается наибольшая степень аккумуляции элементов в побегах. Прибавка от внесения зоогумуса здесь составила 39,9%, от фульвокислот — 84,5%. Второе место по аккумуляции элементов в побегах занимает сорт Победа-11 (с показателями 28,3% и 69,1% относительно контроля соответственно). У сорта Авангард эти показатели были не столь ярко выражены. Этот результат означает, что биомасса растения, являясь важным признаком селективности сорта, не всегда полноценно отображает изменения в его биохимическом составе и питательной ценности. Отмечено снижение накопления элементов в биомассе растений сорта ВИР 21 под воздействием органических добавок, что указывает на отсутствие у него отзывчивости к системе экологического возделывания и большую адаптированность к применению минеральных удобрений.

В начальный ювенильный период развития растений в них в основном формируются зачатки всех органов растений, а на последующих этапах развития происходит накопление клеточной биомассы органов делением растительных клеток без изменения их биохимического состава. На последующих этапах развития растений происходят массонакопительные процессы, представляющие собой деление идентичных клеток, в которых будет сохраняться неизменным соотношение химических элементов. Следовательно, профиль биохимических элементов, сформированный в растениях в начальный ювенильный период, будет сохраняться в растениях и на последующих этапах развития. Если реальный биохимический профиль совпадает с проектным профилем, то мы считаем, что в растениях сформируется идеальная фрактальная композиция химических элементов, при которой растение будет развиваться максимально быстро [77].

Нейросетевой анализ показал, что наибольшая интенсивность массонакопительных и биохимических процессов наблюдается у гуара сорта Победа-17 при обогащении субстрата ФК. При внесении ЗГ наибольшая когерентность или согласованность режима питания и накопления зеленой биомассы наблюдается у гуара сорта Находка. Сорт Авангард на обоих органических фонах занимал второе место (Рисунок 7).

Изученные органические добавки также могут быть совместно использованы с изученными к настоящему моменту времени штаммами ризобактериями, выделенными из клубеньков гуара и принадлежащими к родам *Bradyrhizobium* и *Ensifer* [78]. Помимо дифференциации применения минеральных удобрений, стимуляции роста всходов, экстракты зоогумуса и фульвокислот сапропеля могут быть использованы здесь как модифицирующие добавки и стабилизаторы

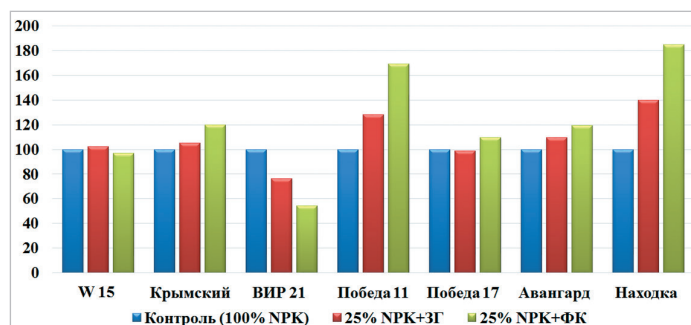


Рисунок 6. Изменение суммарного накопления элементов в зеленой биомассе побегов различных сортов гуара под влиянием органических добавок, %
Figure 6. Changes in the total accumulation of elements in the green biomass of sprouts of various guar varieties under the effect of organic additives, %

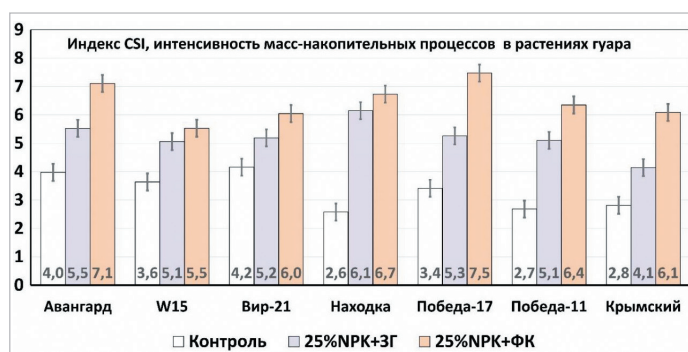


Рисунок 7. Значения индекса CSI, представляющего интенсивность массонакопительных процессов в молодых побегах гуара по вариантам опыта

Figure 7. Values of the CSI index representing the intensity of the mass accumulation processes in the young sprouts of guar by the variants of the experiment

ры титра жизнеспособных клеток бактерий в биотехнологии создания эффективных азотфиксирующих симбиосистем на основе гуара [79]. Изучение процессов в микробно-растительных биосистемах под влиянием органоминеральных удобрений и микробиологических препаратов является задачей будущих исследований.

4. Выводы

На основании проведенных исследований можно отметить, что морфометрические показатели роста побегов различных сортов гуара, выращенных с применением органоминеральных добавок, существенно превышали контроль с использованием минеральных удобрений. В среднем по сортам прибавка в высоте побегов на зоогумусе составила 17,6%, на фульвокислоте — 24,5%. По итогу работы можно выделить сорта Находка и Авангард как наиболее перспективные для дальнейшего возделывания по данной технологии с целью снижения себестоимости и повышения экологичности урожая. При этом известно, что сорт Находка практически не поражается болезнями и не повреждается вредителями. Основное применение этого растения — получение эфирных масел и использование в декоративных целях. Для экологически чистого зеленого корма рекомендуется выбирать сорт Авангард.

Современные исследования в области физиологии растений подчеркивают необходимость комплексной оценки не только абсолютных показателей продуктивности, но и структурной согласованности метаболических процессов. Использование нейросетей как дополнительного математического инструментария позволяет минимизировать риски использования внешних ресурсов (удобрений) и максимально задействовать вводимые локальные факторы (органику, источники энергии, аэрации и пр.) при моделировании условий внешней среды и прогнозирования урожая. Рассчитанные индексы CSI показали большую отзывчивость сорта Находка на прибавку в биомассе под влиянием зоогумуса. На фоне фульвокислот значения его индексов немного уступали сортам Авангард и Победа-17, при этом опережали их в суммарном пуле накопления биогенных элементов, главным образом за счет повышенной аккумуляции в побегах бора, марганца и калия. Кластеризация В-К-Mn-Mg, формирующая функциональный модуль, ответственна за 78% вариации индекса структурной когерентности (CSI). Выявленная положительная корреляция между содержанием марганца и CSI-индексом ($r = 0,92$) может объясняться его ключевой ролью в активации супероксиддисмутазы, регулирующей окислительно-восстановительный баланс в условиях биотического стресса. Синергия элементов В, К и Мп, выявленная в нашем исследовании, согласуется с результатами исследований других бобовых культур, где данный элементный комплекс связан с эффективностью азотфиксации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/ REFERENCES

- Whistler, R. L., Hymowitz, T. (1979). Guar: Agronomy, Production, Industrial Use and Nutrition. Purdue University Press, Indiana, 1979.
- Костенкова, Е. В., Рейнштейн, Л. Н., Остапчук, П. С. (2015). Применение *Cyamopsis Tetragonoloba* (L.) в кормлении сельскохозяйственных животных, птицы и рыб: проблемы и перспективы. *Таврический вестник аграрной науки*, 2(4), 108–117. [Kostenkova, E. V., Reinshtein, L. N., Ostapchuk, P. S. (2015). The problems and perspectives of application of *Cyamopsis Tetragonoloba* (L.) in feeding of agricultural animals, birds and fish. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*, 2(4), 108–117. (In Russian)]
- Chiofalo, B., Presti, V. L., D'Agata, A., Rao, R., Ceravolo, G., Gresta, F. (2018). Qualitative profile of degummed guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) seeds grown in a Mediterranean area for use as animal feed. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 102(1), 260–267. <https://doi.org/10.1111/jpn.12687>
- Biel, W., Jaroszevska, A. (2019). Compositional and nutritional evaluation of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) meal. *Animal Nutrition and Feed Technology*, 19(3), 385–393. <https://doi.org/10.5958/0974-181X.2019.00036.2>
- Gautam, R., Verma, A. K., Dwivedi, S., Jhang, T. (2024). Breeding guar [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub]: A variety compendium of a multifaceted industrial crop

- for resource-constrained scenario in India. *Industrial Crops and Products*, 214, Article 118502. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118502>
6. Дзюбенко, Е. А., Сафронова, В. И., Вишнякова, М. А. (2023). Селекция гуара в Российской Федерации в связи с перспективой производства отечественной камеи (обзор). *Сельскохозяйственная биология*, 58(1), 43–59. [Dzyubenko, E. A., Safronova, V. I., Vishnyakova, M. A. (2023). Objectives of guar breeding in the Russian Federation in connection with the prospects of domestic guar gum production (review). *Agricultural Biology*, 58(1), 43–59. (In Russian)] <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.1.43rus>
 7. Sharma, P., Gummagolmath, K. C. (2012). Reforming guar industry in India: Issues and strategies. *Agricultural Economics Research Review*, 25, 37–48.
 8. Mudgil, D., Barak, S., Khatkar, B. S. (2014). Guar gum: Processing, properties and food applications — A Review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(3), 409–418. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0522-x>
 9. Баюров, Л. И., Дмитриенко, С. Н. (2023). Гуар и его использование в питании людей и животных. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, 192, 22–39. [Bayurov, L. I., Dmitrienko, S. N. (2023). Guar and its importance in the nutrition of people and animals. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 192, 22–39. (In Russian)]
 10. Tahmouzi, S., Meftahizadeh, H., Eysbi, S., Mahmoudzadeh, A., Alizadeh, B., Mollakhalili-Meybodi N. et al. (2023). Application of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) gum in food technologies: A review of properties and mechanisms of action. *Journal of Food Science and Nutrition*, 11(9), 4869–4897. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3383>
 11. Kotnala, B., Panneerselvam, V., Vijayakumar, A. K. (2024). Physicochemical, structural, and functional characterization of guar meal protein isolate (*Cyamopsis tetragonoloba*). *Heliyon*, 10(3), Article e24925. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24925>
 12. Fazeli-Nasab, B., Khajeh, H., Piri, R., Moradian, Z. (2023). Effect of humic acid on germination characteristics of *Lallemantia royleana* and *Cyamopsis tetragonoloba* under salinity stress. *Iranian Journal of Seed Research*, 9(2), 51–62. <https://doi.org/10.61186/yujrs.9.2.51>
 13. Ahmadi, S., Hatamzadeh, A., Bigluei, M. H., Sahrarou, A. (2017). Effect of humic acid on some morphological traits of Guar (*Cyamopsis tetragonoloba*) in Karaj region. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)*, 11(1), 287–295.
 14. Ahmadi, F., Telavat, M. R. M., Siadat, S. A., Moshattati, A. (2019). Effect of different concentrations of humic acid on guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) yield and nutrients uptake in different sowing densities. *Journal of Crop Production and Processing*, 9(1), 33–49. <https://doi.org/10.29252/jcpp.9.1.33>
 15. Yashraj, Singh, M. K., Katiyar, H., Tyagi, V., Vinayak, Tomar, H. et al. (2023). The effect of integrated nutrient management on various growth parameters of cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(10), 3427–3431. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i103011>
 16. Karthikeyan, M., Gajalakshmi, S., Abbasi, S. A. (2014). Comparative efficacy of vermicomposted paper waste and inorganic fertilizer on seed germination, plant growth and fruiting of *Cyamopsis tetragonoloba*. *Journal of Applied Horticulture*, 16(1), 40–45. <https://doi.org/10.37855/jah.2014.v16i01.05>
 17. Дашко, Р. Э., Власов, Д. Ю., Пушина, З. В., Утенкова, Т. Г., Иванов, С. Л. (2023). Многокомпонентный состав сапропелей как основа для совершенствования техники и технологии их деградации. *Russian Journal of Earth Sciences*, 23(2), Статья ES2002. [Dashko, R., Vlasov, D., Pushina, Z., Utenkova, T., Ivanov, S. (2023). Multicomponent composition of sapropels as a basis for perfection of technique and technology of their dehydration. *Russian Journal of Earth Sciences*, 23(2), Article ES2002. (In Russian)] <https://doi.org/10.2205/2023ES000840>
 18. Пендюрин, Е. А., Рыбина, С. Ю., Смоленская, Л. М. (2020). Использование зоокомпоста черной львинки в качестве органического удобрения. *Аграрная наука*, 7–8, 106–110. [Penduryin, E. A., Rybina, S. Yu., Smolenskaya, L. M. (2020). Using the zoo compost of the black lioness as an organic fertilizer. *Agrarian Science*, 7–8, 106–110. (In Russian)] <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-340-7-106-110>
 19. Elissen, H., van der Weide, R., Gollenbeek, L. (2023). Effects of black soldier fly frass on plant and soil characteristics: A literature overview. Wageningen Plant Research, Report WPR-996.
 20. Vasavi, G., Arunakumari, J., Reddy, G. K., Nirmala, A., Anitha, V. (2024). Impact of black soldier fly larval frass on growth and yield of cluster bean (*Cyamopsis Tetragonoloba* L.). *International Journal of Plant and Soil Science*, 36(8), 854–863. <https://doi.org/10.9734/ijps/2024/v36i84916>
 21. Пендюрин, Е. А., Здоровцов, В. А., Рыбина, С. Ю., Святченко, А. В. (2024). Агрохимические характеристики зоокомпоста личинок насекомого черная львинка. *Агрохимический вестник*, 3, 59–62. [Penduryin, E. A., Zdorovtsov, V. A., Rybina, S. Yu., Svyatchenko, A. V. (2024). Agrochemical characteristics of zoocompost black soldier fly larvae. *Agrochemical Herald*, 3, 59–62. (In Russian)] <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-3-010>
 22. Песцов, Г. В., Третьякова, А. В., Прокудина, О. В. (2022). Экологически безопасная утилизация отходов сельского хозяйства с использованием насекомого вида *Hermetia illucens*. *Биосфера*, 14(4), 362–364. [Pestsov, G. V., Tretyakova, A. V., Prokudina, O. V. (2022). Environmentally safe disposal of agricultural waste using the insect species *Hermetia illucens*. *Biosfera*, 14(4), 362–364. (In Russian)] <https://doi.org/10.24855/biosfera.v14i4.696>
 23. Arnone, S., De Mei, M., Petrazzuolo, F., Musmeci, S., Tonelli L., Salvicchi A. et al. (2022). Black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) as a high-potential agent for bioconversion of municipal primary sewage sludge. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(43), 64886–64901. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20250-w>
 24. Rehman, S. ur, De Castro, F., Aprile, A., Benedetti, M., Fanizzi, F. P. (2023). Vermicompost: Enhancing plant growth and combating abiotic and biotic stress. *Agronomy*, 13(4), Article 1134. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041134>
 25. Beesigamukama, D., Subramanian, S., Tanga, C. M. (2022). Nutrient quality and maturity status of frass fertilizer from nine edible insects. *Scientific Reports*, 12, Article 7182. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11336-z>
 26. Lopes, I. G., Yong, J. W., Lalander, C. (2022). Frass derived from black soldier fly larvae treatment of biodegradable wastes. A critical review and future perspectives. *Waste Management*, 142, 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.007>
 27. Basri, N. E. A., Azman, N. A., Ahmad, I. K., Suja, F., Jalil, N. A. A., Amrul, N. F. (2022). Potential applications of frass derived from black soldier fly larvae treatment of food waste: A review. *Foods*, 11(17), Article 2664. <https://doi.org/10.3390/foods11172664>
 28. Gärtling, D., Schulz, H. (2021). Compilation of black soldier fly frass analyses. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(1), 937–943. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00703-w>
 29. Green, T. R., Popa, R. (2012). Enhanced ammonia content in compost leachate processed by black soldier fly larvae. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 166(6), 1381–1387. <https://doi.org/10.1007/s12010-011-9530-6>
 30. Jalil, N. A. A., Abdullah, S. H., Ahmad, I. K., Basri, N. E. A., Mohamed, Z. S. (2021). Decomposition of food waste from protein and carbohydrate sources by black soldier fly larvae, *Hermetia illucens* L. *Journal of Environmental Biology*, 42(3(SI)), 756–761. [https://doi.org/10.22438/jeb/42/3\(SI\)/JEB-04](https://doi.org/10.22438/jeb/42/3(SI)/JEB-04)
 31. Sarpong, D., Odoro-Kwarteng, S., Gyasi, S. F., Buamah, R., Donkor, E., Awuah, E. et al. (2019). Biodegradation by composting of municipal organic solid waste into organic fertilizer using the black soldier fly (*Hermetia illucens*) (Diptera: Stratiomyidae) larvae. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8(S1), 45–54. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-0268-4>
 32. Schmitt, E., de Vries, W. (2020). Potential benefits of using *Hermetia illucens* frass as a soil amendment on food production and for environmental impact reduction. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 25, Article 100335. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.03.005>
 33. Surendra, K., Tomberlin, J. K., van Huis, A., Cammack, J. A., Heckmann, L.-H. L., Khanal, S. K. (2020). Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF). *Waste Management*, 117, 58–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>
 34. Scala, A., Cammack, J. A., Salvia, R., Scieuzo, C., Franco, A., Bufo, S. A. et al. (2020). Rearing substrate impacts growth and macronutrient composition of *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) larvae produced at an industrial scale. *Scientific Reports*, 10(1), Article 19448. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76571-8>
 35. Poveda, J., González-Andrés, F. (2021). Bacillus as a source of phytohormones for use in agriculture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(23), 8629–8645. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11492-8>
 36. Zhang, Y., Meng, Z., Li, S., Liu, T., Song, J., Li, J. et al. (2023). Two antimicrobial peptides derived from bacillus and their properties. *Molecules*, 28(23), Article 7899. <https://doi.org/10.3390/molecules28237899>
 37. Puan, S. L., Erriah, P., Baharudin, M. M. A., Yahaya, N. M., Kamil, W. N. I. W. A., Ali, M. S. M. et al. (2023). Antimicrobial peptides from Bacillus spp. and strategies to enhance their yield. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107(18), 5569–5593. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12651-9>
 38. Choyam, S., Jain, P. M., Kammara, R. (2021). Characterization of a potent new-generation antimicrobial peptide of bacillus. *Frontiers in Microbiology*, 12, Article 710741. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.710741>
 39. Tran, Q. V., Pakina, E. N., Ha, C. V. (2024). Identification of antimicrobial peptide biosynthetic genes of *Bacillus pumilus* in suppression of *Phytophthora* spp. *Far Eastern Agricultural Journal*, 18(2), 80–88. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-2-80-88>
 40. Sumi, C. D., Yang, B. W., Yeo, I.-C., Hahn, Y. T. (2015). Antimicrobial peptides of the genus Bacillus: A new era for antibiotics. *Canadian Journal of Microbiology*, 61(2), 93–103. <https://doi.org/10.1139/cjm-2014-0613>
 41. Arabzadeh, G., Delisle-Houde, M., Vandenberg, G. W., Derome, N., Deschamps, M.-H., Dorais, M. et al. (2023). Assessment of antifungal/anti-oomycete activity of frass derived from black soldier fly larvae to control plant pathogens in horticulture: Involvement of *Bacillus velezensis*. *Sustainability*, 15, Article 10957. <https://doi.org/10.3390/su151410957>
 42. Siddiqui, S. A., Gadge, A. S., Hasan, M., Rahayu, T., Povetkin, S. N., Fernando, I. et al. (2024). Future opportunities for products derived from black soldier fly (BSF) treatment as animal feed and fertilizer — A systematic review. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 30273–30354. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04673-8>
 43. Пендюрин, Е. А., Сапронова, Ж. А., Токач, Ю. Е. (2023). Зоокомпост личинок мухи черная львинка как влагоудерживающий агент в почвах. *Природообустройство*, 3, 59–65. [Penduryin, E. A., Sapronova, Zh. A., Tokach, Yu. E. (2023). Zoocompost of black lion fly larvae as a moisture-retaining agent in soils. *Prirodoobustroystvo*, 3, 59–65. (In Russian)] <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-3-59-65>
 44. Чилачава, К. Б., Песцов, Г. В., Муравлев, Н. С., Глазунова, А. В., Бойкова, О. В. (2019). Изучение фунгицидных свойств фульвовых кислот. *Аграрная наука*, 2, 172–174. [Chilachava, K. B., Pestsov, G. V., Glazunova, A. V., Muravlev, N. S., Boykova, O. V. (2019). Study of the fungicidal properties of fulvic acids. *Agrarian Science*, 2, 172–174. (In Russian)] <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-326-2-172-174>
 45. Kamel, S. M., Afifi, M. M. I., El-Shoraky, F. S., El-Sawy, M. M. (2014). Fulvic acid: A tool for controlling powdery and downy mildew in cucumber plants. *International Journal of Phytopathology*, 3(2), 101–104. <https://doi.org/10.33687/phytopath.003.02.0866>
 46. Vanimuthu, K., Kavitha, K., Paul, J. A. J., Kumar, P., Gowrishankar, S., Balachandrar, R. et al. (2024). Isolation, characterization and antifungal behavior of humic acid and fulvic acid fractions from biowaste derived vermicomposts. *Research Square*, Preprint Article. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4221685/v1>
 47. Удалова, О. Р., Мирская, Г. В., Конончук, П. Ю., Панова, Г. Г. (2021). О влиянии растворов фульвокислот из сапропеля на растения салата при различных видах его обработки. *Аграрный вестник Урала*, 06(209), 22–33. [Udalova, O. R., Mirskaya, G. V., Kononchuk, P. Yu., Panova, G. G. (2021). About the influence of solutions of fulvic acids from sapropel on lettuce plants in various types of its processing. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 06(209), 22–33. (In Russian)] <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-209-06-22-33>
 48. Barakova, N. V., Sharova, N. Y., Juskauskajte, A. R., Mityukov, A. S., Romanov, V. A., Nsengumuremyi, D. (2017). Fungicidal activity of ultradisperse humic sapropel suspensions. *Agronomy Research*, 15(3), 639–648. <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2019-12-3-25-31>

49. Akçura, M., Müftüoğlu, N. M., Kaplan, M., Türkmen, C. (2020). Nutrient potential and mineral contents of some vegetable cluster bean genotypes. *Cereal Chemistry*, 97(6), 1193–1203. <https://doi.org/10.1002/cche.10341>
50. Kuniya, N., Patel, B. B., Malav, J. K., Chaudhary, N., Pavaya, R. P., Patel, J. K. et al. (2019). Yield and nutrient content and uptake by cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) as influenced by different levels of sulphur and zinc application under light textured soil. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(3), 2160–2163.
51. Manohar, C. V. S., Sharma, O. P., Verma, H. P. (2018). Nutrient status and yield of cluster bean [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub] as influenced by fertility levels and liquid biofertilizers. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(5), 1840–1843.
52. Müftüoğlu, N. M., Çikili, Ya., Türkmen, C., Akçura, M. (2022). Molibden uygulamasının sakız fasulyesinin (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) farklı organlarında bazı besin elementleri miktarına etkisi. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 8(1), 1–7. (In Turkish). <https://doi.org/10.28979/jaarnas.91062>
53. Tiwari, D. K., Pareek, B. L., Singh B. (2017). Effect of sulphur and iron levels on yield and nutrient content and uptake of Clusterbean [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.] in arid region of Rajasthan. *Annals of Agricultural Research*, 38(2).
54. Virro, I., Arak, M., Maksarov, V., Olt, J. (2020). Precision fertilisation technologies for berry plantation. *Agronomy Research*, 18(S4), 2797–2810. <https://doi.org/10.15159/AR.20.207>
55. Vasilyeva, M., Kovshov, S., Zambrano, J., Zhemchuzhnikov, M. (2021). Effect of magnetic fields and fertilizers on grass and onion growth on technogenic soils. *Journal of Water and Land Development*, 49, 55–62. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137096>
56. Hypochlorite, S., Singh, B. K., Ali, M. N., Samanta, S., Mandal, N. A. (2021). Comparative analysis among different surface sterilisation methods for rice invitro culture. *International Journal of Plant and Soil Science*, 33(17), 148–154. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2021/v33i1730559>
57. Kyriacou, M. C., El-Nakhel, C., Pannico, A., Graziani, G., Soteriou, G. A., Giordano, M. et al. (2020). Phenolic constitution, phytochemical and macronutrient content in three species of microgreens as modulated by natural fiber and synthetic substrates. *Antioxidants*, 9(3), Article 252. <https://doi.org/10.3390/antiox9030252>
58. Pashkevich, M. A., Bech, J., Matveeva, V. A., Alekseenko, A. V. (2020). Biogeochemical assessment of soils and plants in industrial, residential and recreational areas of Saint Petersburg. *Journal of Mining Institute*, 241, 125–130. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.125>
59. Alekseenko, V. A., Shvydkaya, N. V., Bech, J., Puzanov, A. V., Nastavkin, A. V. (2021). Trace element accumulation by soils and plants in the North Caucasian geochemical province. *Journal of Mining Institute*, 247, 141–153. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.15>
60. Senila, M. (2024). Recent advances in the determination of major and trace elements in plants using inductively coupled plasma optical emission spectrometry. *Molecules*, 29(13), Article 3169. <https://doi.org/10.3390/molecules29133169>
61. Yener, İ. (2019). Trace element analysis in some plants species by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(3), 1492–1502. <https://doi.org/10.21597/jist.517739>
62. Sutrop, U. (2001). List task and a cognitive salience index. *Field Methods*, 13(3), 263–276. <https://doi.org/10.1177/1525822X0101300303>
63. Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 61, 85–117. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003>
64. Погодаев, А. К., Хабибуллина, Е. Л., Инютин, Д. М. (2021). Применение нейросетевых моделей для построения продукционных правил экспертных систем. *Прикладная математика и вопросы управления*, 2, 73–92. [Pogodaev, A. K., Khabibullina, E. L., Inyutin, D. M. (2021). Applying neural network models to the construction of production rules expert systems. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2, 73–92. (In Russian)] <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2021.2.05>
65. Widrow, B., Greenblatt, A., Kim, Y., Park, D. (2013). The no-prop algorithm: A new learning algorithm for multilayer neural networks. *Neural Networks*, 37, 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2012.09.020>
66. Tang, D., Chen, M., Huang, X., Zhang, G., Zeng, L., Zhang, G. et al. (2023). SRplot: A free online platform for data visualization and graphing. *PLoS One*, 18(11), Article e0294236. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294236>
67. Vera-Maldonado, P., Aquea, F., Reyes-Díaz, M., Cárcamo-Fincheira, P., Soto-Cerda, B., Nunes-Nesi, A. et al. (2024). Role of boron and its interaction with other elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 15, Article 1332459. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1332459>
68. Alejandro, S., Höller, S., Meier, B., Peiter, E. (2020). Manganese in plants: From acquisition to subcellular allocation. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 300. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300>
69. Xu, X., Du, X., Wang, F., Sha, J., Chen, Q., Tian, G. et al. (2020). Effects of potassium levels on plant growth, accumulation and distribution of carbon, and nitrate metabolism in apple dwarf rootstock seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 904. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00904>
70. Prajapati, K., Modi, H. A. (2012). The importance of potassium in plant growth—a review. *Indian Journal of Plant Sciences*, 2–3, 177–186.
71. Hasanuzzaman, M., Bhuyan, B., Nahar, K., Hossain, S., Mahmud, J. A., Hossen, S. et al. (2018). Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy*, 8, Article 31. <https://doi.org/10.3390/agronomy8030031>
72. Lozek, O., Fecenko, J. (1996). Effect of foliar application of manganese, boron and sodium humate on the potato production. *Zeszyty Problemowe Postepow Nauk Rolniczych*, 434, 169–172.
73. Sharma, A., Aakash, Singh, D., Singh, V., Bhayal, D., Rajput, B. (2023). Effect of foliar application of boron, zinc and manganese on dry matter accumulation, total tuber yield and economic feasibility of potato (*Solanum Tuberosum*) Cv. Kufri Chipsona-1 under Gwalior climatic conditions. *Journal of Experimental Agriculture International*, 45(11), 253–262. <https://doi.org/10.9734/jeai/2023/v45i112256>
74. Rahman, M., Islam, M., Alam, M., Sharifuzzaman, S., Mian, M. (2022). Effect of foliar application of boron on the yield and quality of potato. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 45(2), 125–135. <https://doi.org/10.3329/bjar.v45i2.59860>
75. Mehdi, K., Reza, M. M., Reza, K. A., Soheila, R. (2008). Evaluation of manganese, boron, potassium, calcium and zinc effects on yield and fruit quality of barberry (*Berberis vulgaris* L.) plants. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 49(5), 293–297.
76. Baqir, H. A., Zeboon, N. H., Al-Behadili, A. A. J. (2019). The role and importance of amino acids within plants: A review. *Plant Archives*, 19, 1402–1410.
77. Воробьев, Н. И., Пухальский, Я. В., Свиридова, О. В., Пищик, В. Н., Панферова, Т. В., Ивахнюк, Г. К. (01–02 октября, 2020). Фрактальная композиция количественных соотношений химических элементов в растениях. Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2020. [Vorobyov, N. I., Pukhalsky, Ya. V., Sviridova, O. V., Pishchik, V. N., Panferova, T. V., Ivakhnyuk, G. K. (October 01–02, 2020). *Fractal composition of quantitative relations of chemical elements in plants*. Contribution of agrophysics to solving the fundamental tasks of agricultural science. Saint-Petersburg: Agrophysical Research Institute, 2020. (In Russian)]
78. Кузнецова, И. Г., Сазанова, А. Л., Сафронова, В. И., Попова, Ж. П., Соколова, Д. В., Тихомирова, Н. Ю. и др. (2018). Выделение и идентификация клубеньковых бактерий гуара *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub. *Сельскохозяйственная биология*, 53(6), 1285–1293. [Kuznetsova, I. G., Sazanova, A. L., Safronova, V. I., Popova, J. P., Sokolova, D. V., Tikhomirova, N. Yu. et al. (2018). Isolation and identification of root nodule bacteria from guar *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub. *Agricultural Biology*, 53(6), 1285–1293. (In Russian)] <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2018.6.1285rus>
79. Ульянич, П. С., Белимов, А. А., Кузнецова, И. Г., Сазанова, А. Л., Юзихин, О. С., Лактионов, Ю. В. и др. (2022). Эффективность азотфиксирующего симбиоза гуара (*Cyamopsis tetragonoloba*) со штаммами *Bradyrhizobium retamae* rcam05275 и *Ensifer aridi* rcam05276 в вегетационном опыте. *Сельскохозяйственная биология*, 57(3), 555–565. [Ulianich, P. S., Belimov, A. A., Kuznetsova, I. G., Sazanova, A. L., Yuzikhin, O. S., Laktionov, Yu. V. et al. (2022). Effectiveness of nitrogen-fixing symbiosis of guar (*Cyamopsis tetragonoloba*) with strains *Bradyrhizobium retamae* rcam05275 and *Ensifer aridi* rcam05276 in pot experiment. *Agricultural Biology*, 57(3), 555–565. (In Russian)] <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2022.3.555rus>

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	Принадлежность к организации
Лоскутов Святослав Игоревич — кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией промышленных биотехнологических инноваций, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: lislosk@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8102-2900	Svyatoslav I. Loskutov, Candidate of Agricultural Sciences, Head of the Laboratory of Industrial Biotechnological Innovations, All-Russian Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia E-mail: lislosk@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8102-2900
Пухальский Ян Викторович — научный сотрудник, лаборатория промышленных биотехнологических инноваций, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: puhalskyan@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5233-3497 * автор для контактов	Yan V. Puhalsky, Researcher, Laboratory of Industrial Biotechnological Innovations, All-Russian Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia E-mail: puhalskyan@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5233-3497 * corresponding author

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	Принадлежность к организации
Чукаева Мария Алексеевна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория мониторинга экологической обстановки, Научный центр «Экосистема», Санкт-Петербургский горный университет Императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2 E-mail: chukaeva_ma@pers.spmi.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3643-6757	Maria A. Chukaeva , Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory for Monitoring the Environmental Situation, Scientific Center “Ecosystem”, Saint Petersburg Mining University 2, 21st Line, 199106, St. Petersburg, Russia, E-mail: chukaeva_ma@pers.spmi.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3643-6757
Воробьев Николай Иванович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория биоразнообразия сельскохозяйственных микроорганизмов, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, 196608, Санкт-Петербург, Пушкин-8, шоссе Подбельского, 3 E-mail: nik.ivanvorobyov@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8300-2287	Nikolay I. Vorobyov , Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Biodiversity of Agricultural Microorganisms, All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology 3, Podbelsky highway, 196608, Pushkin 8, Saint-Petersburg, Russia E-mail: nik.ivanvorobyov@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8300-2287
Виноградов Зосим Сергеевич — кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, отдел физиологии растений, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова 196031 Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44 E-mail: vinogradov.vir@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2978-0481	Zosim S. Vinogradov , Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Department of Plant Physiology, Federal Research Center the N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources 42, 44, Bolshaya Morskaya Str., 190031 St. Petersburg, Russia E-mail: vinogradov.vir@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2978-0481
Осипов Анатолий Иванович — доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, отдел моделирования адаптивных агротехнологий, Агрофизический научно-исследовательский институт 195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14 E-mail: aosipov2006@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3181-3792	Anatoly I. Osipov , Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher, Department of Modeling Adaptive Agricultural Technologies, Agrophysical Research Institute 14, Grazhdansky Prospekt, 195220, St. Petersburg, Russia E-mail: aosipov2006@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3181-3792
Митюков Алексей Савельевич — доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Лаборатории комплексных проблем лимнологии, Институт озероведения Российской академии наук — обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук 196105, Россия, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9 E-mail: mitals@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6904-0419	Aleksey S. Mityukov , Doctor of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Laboratories of Complex Problems of Limnology, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences 9, Sevast'yanova Str., 196105, St. Petersburg, Russia E-mail: mitals@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6904-0419
Тютюма Наталья Владимировна — доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН, директор, Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН 416251, Астраханская обл., с. Соленое Займище, квартал Северный, 8 E-mail: tutumanv@list.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6582-2628	Natalia V. Tyutyuma , Doctor of Agricultural Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director, Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of Russian Academy of Sciences 8, sq. Severny, village of Saline Zaymishche, 416251, Astrakhan region, Russia E-mail: tutumanv@list.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6582-2628
Бондаренко Анастасия Николаевна — доктор сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией агротехнологий овощных культур, Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН 416251, Астраханская обл., с. Соленое Займище, квартал Северный, 8 E-mail: bondarenko-a.n@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4816-5667	Anastasia N. Bondarenko , Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Laboratory of Agrotechnology of vegetable crops, Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of Russian Academy of Sciences 8, sq. Severny, village of Saline Zaymishche, 416251, Astrakhan region, Russia E-mail: bondarenko-a.n@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4816-5667
Ситнов Вениамин Юрьевич — директор, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Санкт-Петербург, Литейный проспект, 55 E-mail: v.sitnov@fnpcs.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1927-1997	Veniamin Yu. Sitnov , Director, All-Russia Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia E-mail: v.sitnov@fnpcs.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1927-1997
Contribution	Критерии авторства
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Conflict of interest	Конфликт интересов
The authors declare no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.