

Н.И. Воробьев¹
Я.В. Пухальский² ✉
С.И. Лоскутов²
А.В. Бабыка³
А.И. Якубовская⁴
И.А. Каменева⁴
А.И. Осипов⁵
В.Р. Турковская³
В.В. Космин⁶
М.П. Сакович⁶

¹Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, Пушкин, Санкт-Петербург Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок — филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ООО «Фарморганик», Санкт-Петербург, Россия

⁴Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия

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

⁶ООО Organic farm Green Punch, Санкт-Петербург, Россия

✉ puhalskyan@gmail.com

Поступила в редакцию: 24.03.2025
Accepted in revised: 12.07.2025
Accepted for publication: 27.07.2025

© Воробьев Н.И., Пухальский Я.В., Лоскутов С.И., Бабыка А.В., Якубовская А.И., Каменева И.А., Осипов А.И., Турковская В.Р., Космин В.В., Сакович М.П.

Nikolay I. Vorobyov¹
Jan V. Puhalsky² ✉
Svyatoslav I. Loskutov²
Andrey V. Babyka³
Alla I. Yakubovskaya⁴
Irina A. Kameneva⁴
Anatoly I. Osipov⁵
Valeria R. Turkovskaya³
Vladimir V. Kosmin⁶
Mikhail P. Sakovich⁶

¹All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, St. Petersburg, Pushkin, Russia

²The All-Russian Scientific Research Institute of Food Additives is a branch of the V.M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

³LLC «Farmorganik», Saint Petersburg, Russia

⁴Scientific Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia

⁵Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia

⁶LLC Organic farm Green Punch, St. Petersburg, Russia

✉ puhalskyan@gmail.com

Received by the editorial office: 24.03.2025
Accepted in revised: 12.07.2025
Accepted for publication: 27.07.2025

© Vorobyov N.I., Puhalsky J.V., Loskutov S.I., Babyka A.V., Yakubovskaya A.I., Kameneva I.A., Osipov A.I., Turkovskaya V.R., Kosmin V.V., Sakovich M.P.

Нейросетевая оценка эффективности использования фульвокислот в сочетании с минеральными удобрениями на продуктивность и качество листового салата сорта Афицион, выращенного в условиях вертикальной гидропоники

РЕЗЮМЕ

Растущий спрос на экологичную растительную продукцию стимулирует развитие городских сити-ферм закрытого типа. Как инновационная бизнес-модель, они эффективно используют ограниченное пространство мегаполисов, обеспечивая прямой доступ к рынку. Растения выращивают вертикально на гидропонике с автоматическим контролем среды. Для повышения качества продукции и снижения зависимости от минеральных удобрений исследовали частичное замещение их гуминовыми стимуляторами. Проводили опыт с салатом на среде Хогланда: контроль (вода), 50% Хогланда, 100% Хогланда и 50% Хогланда + фульвокислоты (90 млн⁻¹). По окончании измеряли биомассу и элементный состав. Данные обрабатывали нейросетью ChemNN, преобразующей биохимический профиль в индекс CSIelem, указывающий оптимальный режим питания. Результаты опыта показали, что разница в биомассе между 100% и 50% Хогланда составила лишь 9%. Добавка фульвокислот к 50% Хогланда полностью нивелировала эту разницу, повышая биомассу до уровня 100% Хогланда. Фульвокислоты улучшали усвоение макро- и микроэлементов из обедненной среды, что подтверждалось ростом CSIelem для этих элементов. При этом наблюдалось снижение содержания мезоэлементов (Ca, Mg, S). Добавки фульвокислот позволяют сокращать долю минеральных удобрений (до 50%) без потери урожайности и питательной ценности. Для оптимизации усвоения мезоэлементов рекомендуется дополнительное внесение солей кальция, магния и серы в питательный раствор или через листовые подкормки.

Ключевые слова: листовый салат-латук, Афицион, фульвокислоты, гидропоника, нейросеть, режим питания

Для цитирования: Воробьев Н.И. и др. Нейросетевая оценка эффективности использования фульвокислот в сочетании с минеральными удобрениями на продуктивность и качество листового салата сорта Афицион, выращенного в условиях вертикальной гидропоники. *Аграрная наука*. 2025; 397(08): 104–114.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-397-08-104-114>

Neural network assessment of the effectiveness of using fulvic acids in combination with mineral fertilizers on the productivity and quality of Aficion leaf lettuce grown in vertical hydroponics

ABSTRACT

Growing demand for environmentally friendly plant products stimulates the development of closed-type urban city farms. As an innovative business model, they effectively use the limited space of megacities, providing direct access to the market. Plants are grown vertically on hydroponics with automatic environment control. To improve product quality and reduce dependence on mineral fertilizers, their partial replacement with humic stimulants was studied. An experiment was conducted with lettuce on Hoagland medium: control (water), 50% Hoagland, 100% Hoagland, and 50% Hoagland + fulvic acids (90 ppm). After completion, biomass and elemental composition were measured. The data were processed by the ChemNN neural network, which transforms the biochemical profile into the CSIelem index, indicating the optimal nutritional regime. The results of the experiment showed that the difference in biomass between 100% and 50% Hoagland was only 9%. The addition of fulvic acids to 50% Hoagland completely leveled this difference, increasing the biomass to the level of 100% Hoagland. Fulvic acids improved the absorption of macro- and microelements from the depleted environment, which was confirmed by the growth of CSIelem for these elements. At the same time, a decrease in the content of mesoelements (Ca, Mg, S) was observed. Fulvic acid additives allow reducing the share of mineral fertilizers (up to 50%) without losing yield and nutritional value. To optimize the absorption of mesoelements, additional application of calcium, magnesium and sulfur salts to the nutrient solution or through foliar feeding is recommended.

Key words: Lactuca sativa, Aficion, fulvic acids, hydroponics, neural network, nutrient mode

For citation: Vorobyov N.I. et al. Neural network assessment of the effectiveness of using fulvic acids in combination with mineral fertilizers on the productivity and quality of Aficion leaf lettuce grown in vertical hydroponics. *Agrarian science*. 2025; 397(08): 104–114 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-397-08-104-114>

Введение/Introduction

Прогнозируется, что к 2050 году население планеты достигнет 9,7 млрд человек [1]. При этом большинство из них будут проживать в крупных мегаполисах. Рост городских агломераций и сокращение числа плодородных земель на фоне меняющегося климата и загрязнения окружающей среды повлекут за собой сложности в управлении и перераспределении пищевых ресурсов.

Поскольку всё большее количество людей уже сейчас переходят на здоровое питание, снижать нормы и требования к качеству продуктов будет недопустимо. Выходом из создавшегося положения может стать увеличение производства сельскохозяйственной продукции путем строительства в черте города зеленых фабрик (сити-ферм) по производству листовых овощей [2] по типу гидропонных ферм, разрабатываемых компаниями PlantLab (Нидерланды), Philips (Нидерланды), Mirai (Япония).

Сити-фермы уже давно не новость для таких стран, как США или Япония, но в России ростки новой индустрии пока пробиваются с трудом [3]. Первое их продвижение по нашей стране началось с Дальнего Востока в 2016 году. Пандемия 2020 года побудила многих горожан к самоизоляции и остро высветила проблему обеспечения их свежими и богатыми витаминными продуктами, доступными для выращивания в домашних условиях. Этот кризис подчеркнул необходимость активного развития сити-фермерства [4].

Увеличение числа гидропонных ферм в городах не только укрепит национальную продовольственную безопасность и существенно сократит вероятность развития авитаминоза среди населения будущих мегаполисов, но и значительно снизит себестоимость готовой продукции благодаря уменьшению логистических затрат на ее транспортировку из удаленных регионов.

В условиях защищенного грунта растения смогут расти в полностью контролируемых условиях вертикального земледелия на гидропонных установках [5, 6]. Гидропонные системы обеспечивают более эффективное использование воды и растворимых в ней питательных соединений по сравнению с традиционными методами ведения сельского хозяйства в полевых условиях [7, 8]. На 1 м² можно разместить на 30% больше растений, а готовую зеленую продукцию получать круглогодично в промышленном масштабе с полным климат-контролем, без примесей и пестицидов [9]. Растения здесь развиваются на порядок быстрее [10]. Из недостатков технологии пока стоит выделить лишь высокую долю потребления электроэнергии при искусственном освещении закрытых гидроферм.

Среди зеленых овощей, что выращивают в условиях гидропоники, листовая салат или салат-латук

(*Lactuca sativa* L.) из семейства астровых (*Asteraceae*) считается самой популярной, скороспелой и холодостойкой культурой [11]. Помимо высокой маржинальности, салат является богатым источником быстрого восполнения витаминов (A, B₉, C и K), минеральных веществ (йод, цинк, кобальт, медь, молибден, магний, железо, кремний, сера, натрий) и противораковых антиоксидантов (кверцетин, кофейная кислота и лактопикрин) [12].

Растения часто используют в методике биотестирования качества питательного раствора [13]. По своему биохимическому составу он уступает лишь шпинату, имеющему чуть больший срок вегетации. Общая площадь традиционного возделывания составляет порядка 186 млн га.

В 2018 году в мире были произведены около 27,7 млн т салата [14]. Самый высокий объем производства приходится на Китай (54,2–56,3%) [15]. В России производство салата-латука не превышает 15,0 тыс. т в год на площади 700–800 га, что недостаточно для удовлетворения спроса на эту продукцию и не покрывает потребности рынка [16]. В связи с этим, по данным ФТС, с января по апрель и с июня по октябрь 2023 года (периоды, на которые в России приходится пик потребления свежей овощной продукции) импорт салатных овощей из Китая дополнительно составил 1,2 тыс. т [17]. Россия также импортирует салаты из Узбекистана, Беларуси и Сербии.

Сегодня в Государственный реестр селекционных достижений включены 345 сортов салата-латука. Среди их разнообразия, что активно внедряют для выращивания на автоматизированных конвейерных линиях, оснащенных системой точной гидропоники, высоким спросом у потребителей пользуется сорт Афицион РЗ фирмы «Райк Цваан» сорто типа Батавия [18].

В настоящее время сорт занимает 80% посевных площадей [19]. Срок его выгонки составляет чуть более 30 дней. Современные гибриды отличаются улучшенным вкусом, имеют сочные (без горечи) и прочные светло-зеленые листья. Салат не стрелкуется и не образует кочана даже при более длительных сроках выращивания. Растение легко приспосабливается к разным световым режимам и имеет невосприимчивость к ряду заболеваний, например к краевому некрозу. В отличие от обычного листового салата, Афицион дольше хранится в холодильнике.

Для гидропонного выращивания салата разработано множество коммерческих питательных растворов [20] на основе модификации классической рецептуры Хогланда и Арнона¹. По сравнению с традиционным выращиванием салата в почве гидропоника дает в 11 раз более высокую урожайность [21]. Культивирование салата на нейтральных твердых или жидких субстратах

¹ Hoagland D.R., Arnon D.I. The water-culture method for growing plants without soil. Berkeley, Calif.: University of California, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station. 1950; 32.

позволяет снижать нормы использования минеральных удобрений и химических средств защиты за счет применения органических стимуляторов и биофунгицидов. Система гидропоники в данном случае становится более сложной, требующей большего внимания, чем традиционная. Однако конечная продукция здесь получается более экологически безопасной.

В настоящее время гидропоника всё еще находится на стадии изучения и занимает лишь небольшую нишу в крупной пищевой промышленности и производстве овощной зелени [22]. Несмотря на этот факт, спрос на органическую гидропонику будет увеличиваться, поскольку цены на минеральные удобрения постепенно растут.

Наиболее изученными стимуляторами роста для растений салата, выращиваемых в условиях гидропоники, являются гуминоподобные вещества [23–25]. Например, фульвокислота (ФК), являющаяся основным компонентом данных веществ, может способствовать улучшению роста корней, увеличивая их количество, длину и боковую разветвленность, а также массу побегов. Благодаря ее малому молекулярному размеру вместе с водой она легко может проходить через микропоры биологических или искусственных мембранных систем, увеличивая поглощение растениями таких элементов, как азот, фосфор, калий, кальций, магний, медь, железо и цинк. Помимо повышения урожайности и лучшего усвоения питательных элементов, органические стимуляторы (в противоположность минеральным удобрениям) характеризуются пролонгированным высвобождением азота, что позволяет контролировать уровень накопления нитратов в овощных культурах.

Ранее в регулируемых условиях интенсивной гидросветокультуры была подобрана оптимальная концентрация (90 млн⁻¹ или 0,009%) введения раствора ФК в корнеобитаемую среду листового салата [26]. Исследование было проведено с ее внесением совместно с полной дозой питательного раствора Кнопа. Однако не было представлено сравнительной оценки эффективности применения данной концентрации ФК на биомассу и усвоение питательных веществ при снижении насыщенности питательного раствора на 50%. Изучение этого аспекта и послужило целью данной работы.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Эксперимент проведен зимой 2025 года на базе производственного помещения (закрытой фитокомнаты) компании Organic farm Green Punch (г. Санкт-Петербург). В этом эксперименте использовали четырехъярусную гидропонную установку собственного производства с автоматизированной системой водоснабжения и освещения (рис. 1).

Растения выращивали в пластиковых кассетах с 60 ячейками, заполненными верховым известковым торфом. На каждый ярус приходились

по три кассеты (повторности). Согласно рекомендациям, для освещения растений на каждом ярусе использовали светодиодные светильники белого спектра, который максимально совпадает с энергетической кривой К.Д. McCree [27]. Интенсивность освещения составляла 12,4 тыс. Люкс. Фотопериод освещения составлял 14 часов — с 06:00 до 20:00 (каждые сутки). Температурный режим в помещении поддерживали: днем — 25 °С, ночью — 18 °С. Влажность воздуха в помещении поддерживали на уровне 60–70% системой автоматизированного климат-контроля. Эти параметры признаны оптимальными для ускоренного роста салата в условиях домашней гидропоники [28]. Согласно рекомендациям [29], продолжительность светового периода не должна превышать 16 часов, интенсивность освещения — 240 мкмоль·м⁻²·с⁻¹. Невыполнение этих условий может привести к ожогу растений и снижению задержки их развития.

Влажность субстрата в кассетах поддерживали автоматически методом нижней субиригации. В качестве фульвокислотной органической добавки к удобрениям был взят коммерческий препарат Donum (ООО «Фарморганик», Россия).

Состав препарата по данным разработчика приведен в таблице 1.

Раствор Хогланда (Hoagland D.R. и Arnon D.I., 1950) был приготовлен в соответствии с формулой разработчика.

Растения на каждом ярусе имели индивидуальную подпитку согласно выбранной схеме опыта:

- контроль (фильтрованная вода);
- 100%-ный минеральный р-р Хогланда;
- 50%-ный минеральный р-р Хогланда;
- 50%-ный минеральный р-р Хогланда + 90 млн⁻¹ ФК.

Уровень кислотности жидкости при подаче на каждый ярус корректировали еженедельно

Рис. 1. Внешний вид вертикальной гидропонной установки, используемой в опыте (а), и спектральные характеристики установленных на ней фитоламп (б)

Fig. 1. External view of the vertical hydroponic installation used in the experiment (a) and spectral characteristics of the phytolamps installed on it (b)

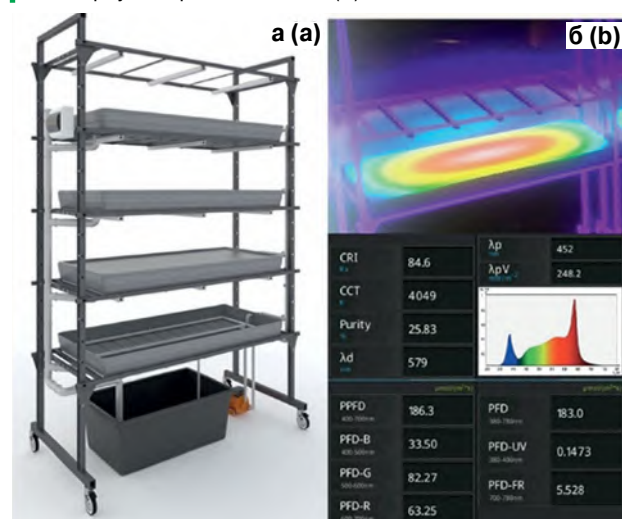


Таблица 1. Биохимический состав исходного биопрепарата Donum (ООО «Фарморганик», Россия)

Table 1. Biochemical composition of the original biopreparation Donum ("Farmorganik" LLC, Russia)

Элементный состав	Содержание	Аминокислота	Содержание, мг/л	Органическая кислота	Содержание, мг/л
C, %	29,2	Метионин	12,1	Фумаровая	0,0
N, %	0,7	Валин	22,8	Уксусная	31,4
K, %	6,4	Гистидин	40,6	Щавелевая	0,0
P, г/кг	0,9	Глицин	1,0	Винная	0,0
S, г/кг	31,8	Глутаминовая	15,8	Лимонная	0,0
Ca, г/кг	1,3	Серин	264,2	Янтарная	0,0
Mg, г/кг	5,5	Лейцин	0,5	Галловая	0,0
Na, г/кг	6,2	Изо-лейцин	0,1	Яблочная	0,0
Fe, г/кг	10,2	Аспарагин	0,3	Адипиновая	0,0
Mn, мг/кг	83,1	Аланин	1,0	Ароматические	
Cu, мг/кг	17,8	Триптофан	0,0		2,9
Zn, мг/кг	23,2	Треонин	0,4	Паракумаровая	13,8
Al, мг/г	1,8	Лизин	0,2	Сиреневая	19,4
Sr, мг/г	0,0	Аргинин	10,0	Ванилиновая	60,1
B, мг/г	94,0	Сицин	0,0	Гидроксифенил-уксусная	108,7
Se, мг/г	0,8	Тирозин	0,0	Углеводы	
Cr, мг/г	1,9	Треонин	0,1		168,3
Ba, мг/г	0,0	Пролин	0,1		5340,1
Co, мг/г	0,1	Цистеин	0,0		87,9
Mo, мг/г	0,0	Фенилаланин	0,0		223,1

с помощью мультипараметрового измерителя Starter ST3100M-F (Ohaus, США) и поддерживали на уровне pH = 5,5–5,8 в течение всего опыта. Общий срок вегетации составил 30 суток.

После 30 суток выращивания побеги растений были собраны и взвешены на аналитических весах PA 214C (Ohaus, США). Затем они были высушены до постоянного воздушно-сухого веса в термостате в течение двух суток при температуре 60 ± 5 °C, так как при комнатной температуре возможно загнивание биомассы и ее загрязнение пылевыми частицами из атмосферы². Высушивание растительных образцов до абсолютно сухого веса для проведения анализа недопустимо, поскольку нарушаются физико-химические свойства, включая растворимость для дальнейшего размола и терморазложения.

В фиксированных образцах определяли зольный состав растений. Для этого образцы измельчали на лабораторной мельнице ЛЗМ-1 («Олис», Россия) и проводили мокрое озоление. Часть полученного порошка (0,1 г) обрабатывали концентрированной азотной кислотой и перекисью водорода, а затем выдерживали в графитовой печи DigiBlock (LabTech, Italy). После этого 100 мл образовавшейся смеси отстаивали в течение суток в 2,0%-ном растворе HNO_3 . По окончании этих процедур отделялся верхний слой супернатанта, в котором с помощью оптической эмиссионной спектрометрии (ИСП-ОЭС) на приборе ICPE-9000 (Shimadzu, Япония) [30] определяли содержание химических

элементов в полученных жидких пробах.

Статистический Anova-анализ и HSD-тест Тьюки выполнены в программе Python с использованием функций `scipy.stats.f\_oneway` и `statsmodels.stats.multicomp.pairwise\_tukeyhsd`. Данные предварительно были проверены на нормальность (тест Шапиро — Уилка) и гомогенность дисперсий (тест Левена). Полученные числовые значения были обработаны с помощью авторской нейросети ChemNN, созданной в Excel-среде (язык VBA)^{3–5}. Нейросеть ChemNN выполняла статистическую обработку цифровых данных с использованием последовательных процедур регрессионного,

корреляционного, кластерного и дискриминантного анализов⁶. Конечным продуктом нейросети ChemNN является расчет безразмерного индекса когнитивной значимости растительной системы CSlelem (Cognitive Salience Index) [34], которому были делегированы права количественно представлять интенсивность биохимических и масс-накопительных процессов. При этом авторы полагают, что максимальные значения индекса CSlelem указывают на максимальную скорость масс-накопительных биохимических процессов в растениях и приближение режима их выращивания к оптимальному.

Дополнительно в нейросети на программном уровне был организован доступ к сервису обучения-поиска Learning, который позволяет изменять алгоритм вычисления индекса CSlelem и осуществлять циклический поиск корректной процедуры его вычисления [31–33].

Общий ход вычисления индекса CSlelem следующий:

1-й этап. Слой нейронов $L1$ преобразует данные матрицы $FPro$, содержащие биохимические характеристики растений, в данные матрицы FWL :

$$FWL_{k,l} = \ln(FPro_{k,l} \times 10^4) - \ln(FPro_{k+1,l} \times 10^4), \quad (1)$$

где: $\sum_{k=1}^{k=N} FPro_{k,l} = 1$ — молярное количество химического элемента с порядковым номером $l = 1, \dots, 11$ в растениях салата и в варианте опыта с порядковым номером $k = 1, \dots, 4$.

² Белоусова Е.Н. Инструментальные методы исследования почв и растений: учеб. пособие. Красноярский государственный аграрный университет. Красноярск. 2014; 267.

³ Гафаров Ф.М., Галимянов А.Ф. Искусственные нейронные сети и приложения. Казань: Изд-во Казанского университета. 2018; 121.

⁴ Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия «ТелКом». 2002; 382.

⁵ Witten I.H., Frank E., Hall M.A., Kaufmann M. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. 3rd ed. Elsevier. 2011; 629.

⁶ Ким Дж.-О., Мюллер Ч.У., Клека У.Р., Олдендерфер М.С., Блэшфилд Р.К. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. Москва. 1989; 216.

2-й этап. Слой нейронов $L1$ построчно нормализует цифровые данные матрицы FWL с помощью стандартной функции нормализации числовых данных $Normalization()$ [35] и записывает результаты нормализации в матрицу $FNorm$:

$$FNorm = Normalization(FWL), \quad (2)$$

3-й этап. Слой нейронов $L1$ вычисляет корреляционную матрицу $Corr$, используя данные в строках матрицы $FNorm$ и стандартную процедуру $Correlation()$ [36]:

$$Corr = Corralation(FNorm), \quad (3)$$

4-й этап. Слой нейронов $L1$ вычисляет произведение матриц $FNorm \times Corr$, нормализует полученные цифровые данные стандартной процедурой $Normalization()$ и записывает результаты нормализации в матрицу $CNorm$:

$$CNorm = Normalization(FNorm \times Corr), \quad (4)$$

5-й этап. Слой нейронов $L2$ вычисляет матрицы Евклидовых дистанций $FDist$ и $CDist$, используя цифровые данные столбцов матриц $FNorm$ и $CNorm$ и стандартную вычислительную процедуру $EuclidDistance()$ ⁷:

$$FDist_{kl} = EuclidDistance(FNorm_{1k}, \dots, FNorm_{Mk}; FNorm_{1l}, \dots, FNorm_{Ml}), \quad (5)$$

$$CDist_{kl} = EuclidDistance(CNorm_{1k}, \dots, CNorm_{Nk}; CNorm_{1l}, \dots, CNorm_{Nl}), \quad (6)$$

где: $k, l = 1, \dots, 4$ — порядковые номера столбцов в матрицах $FNorm$ и $CNorm$; $M, N = 4$ — число столбцов и строк в матрицах $FNorm$ и $CNorm$.

6-й этап. Слой нейронов $L2$ вычисляет матрицы $FCom$ и $CCom$, используя данные матриц $FDist$, $CDist$ и стандартную процедуру вычисления собственных векторов симметричных матриц $EigenVectors()$ ⁸:

$$FCom = EigenVectors(FDist), \quad (7)$$

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

7-й этап. Слой нейронов $L3$ вычисляет значение индекса $CSlelem$ после выбора алгоритма из базы алгоритмов Comby в цикле обучения-поиска нейросети Learning. Вычислительные алгоритмы в базе алгоритмов Comby представляют собой алгебраические выражения с операндами сложения, вычитания, умножения и деления данных матриц $FNorm$, $CNorm$, $FDist$, $CDist$, $FCom$, $CCom$ в разной комбинации [37].

8-й этап. Слой нейронов $L4$ анализирует в каждом цикле настройки-обучения сервиса Learning корреляцию (r) индекса $CSlelem$ с данными вектора биомасс растений $Fbio$. Если корреляция этого индекса не удовлетворяет условию $Abs(r) \geq 0,7$, то выбирается следующий вычислительный алгоритм из базы Comby и повторяются вычисление индекса $CSlelem$ и проверка корреляции с данными вектора биомасс растений $Fbio$. При выполнении условия $Abs(r) \geq 0,7$ настройка-обучение нейросети заканчивается, вычисленные значения индекса $CSlelem$ принимаются как корректные.

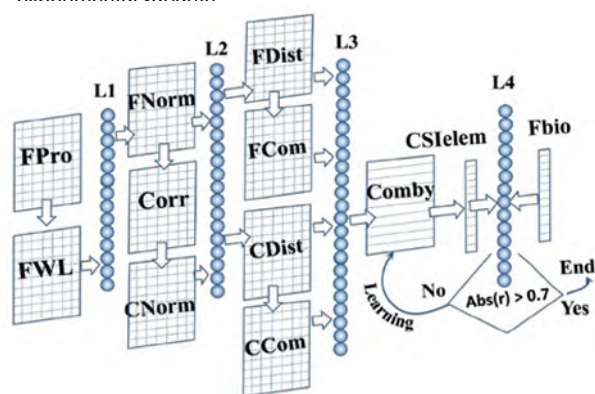
Визуально общая схема всего вычислительного алгоритма нейросети ChemNN представлена на рисунке 2.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Растения, выращенные на минеральном фоне, хорошо отреагировали на внесение удобрений. Причем в сравнении с контролем разница между вариантами составила всего лишь 9% (рис. 3, табл. 2).

Рис. 2. Нейросеть, обрабатывающая фрактальные профили химических элементов растений салата и вычисляющая индекс $CSlelem$. $FPro$, FWL — матрица фрактальных профилей химических элементов и матрица WaveLet-преобразованных данных матрицы $FPro$. $FNorm$, $CNorm$ — матрицы нормализованных данных матрицы FWL и произведения матриц $FNorm \times Corr$. $Corr$ — матрица коэффициентов корреляции между строками матрицы $FNorm$. $FDist$, $CDist$ — матрицы Евклидовых дистанций между столбцами матриц $FNorm$, $CNorm$. $FCom$, $CCom$ — матрицы собственных векторов матриц $FDist$, $CDist$. Learning — цикл обучения-поиска корректного алгоритма нейросети. Comby — база алгоритмов нейросети. $FBio$ — вектор биомасс растений по вариантам опыта

Fig. 2. Neural network processing fractal profiles of chemical elements of lettuce plants and calculating the $CSlelem$ index. $FPro$, FWL — matrix of fractal profiles of chemical elements and matrix of WaveLet-transformed data of the $FPro$ matrix. $FNorm$, $CNorm$ — matrices of normalized data of the FWL matrix and the product of matrices $FNorm \times Corr$. $Corr$ — matrix of correlation coefficients between rows of the $FNorm$ matrix. $FDist$, $CDist$ — matrices of Euclidean distances between columns of the $FNorm$, $CNorm$ matrices. $FCom$, $CCom$ — matrices of eigenvectors of the $FDist$, $CDist$ matrices. Learning — training-search cycle for the correct neural network algorithm. Comby is the base of neural network algorithms. $FBio$ — vector of plant biomasses by experimental variants



⁷ Everitt B.S., Landau S, Leese M., Stahl D. Cluster Analysis. John Wiley & Sons. 2011; 352.

⁸ Маркова Л.В., Корчевская Е.А. Численные методы нахождения собственных векторов и собственных значений матриц. Витебск: ВГУ им. П.М. Машерова. 2011; 47.

Согласно тесту Тьюки, все варианты удобрений значимо увеличивают биомассу растений ($p < 0,001$) — в 2 раза по сравнению с контролем, но между собой не различаются. Внесение ФК вместе с 50%-ным минеральным раствором способствовало набору биомассы на уровне базовой концентрации раствора Хогланда. Этот факт может означать, что ФК не могут полностью заменить минеральные удобрения, но существенно усиливают их эффективность (даже при меньших дозах внесения), оптимизируя таким образом усвоение биогенных элементов из среды растением и снижая потери в биомассе.

Повышение концентрации питательных веществ от половинной до полной дозы в растворе не увеличило концентрацию питательных веществ в растении (табл. 3). Однако суммарный пул накопления макро-, мезо- и микроэлементов в биомассе был заметно выше контроля. Так же как и в отношении веса, добавка ФК хорошо показала себя при аккумуляции питательных веществ (рис. 4). Небольшое снижение было отмечено лишь для мезоэлементов. Вариант с 50%-ной концентрацией минерального раствора здесь оказался самым лучшим, хотя и с такой же высокой долей дисперсии разброса данных, как на контроле.

Результаты однофакторного Анова-анализа для каждого элемента по вариантам сравнения приведены в таблице 4.

Таблица 2. Биомасса растений салата Афицион, выращенных на гидропонной установке в разных вариантах опыта

Table 2. Biomass of Aficion lettuce plants grown in a hydroponic setup in different experimental variants

Вариант	Биомасса салата
Контроль	137,1 ± 9,6
100%-ный минеральный р-р	259,3 ± 25,9
50%-ный минеральный р-р	247,1 ± 15,8
50%-ный минеральный р-р + ФК	263,8 ± 13,1

Таблица 3. Содержание химических элементов в побегах салата-латука по вариантам опыта. Представлено среднее значение ± ошибки средних (n = 7)

Table 3. Content of chemical elements in lettuce shoots by experimental variants. The average values ± standard errors are presented (n = 7)

Вариант	Макроэлементы			Мезоэлементы			Микроэлементы				
	г/кг						мг/кг				
	N	P	K	S	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	B
Контроль	14,0±1,0	2,0±0,2	16,4±1,1	2,9±0,3	10,2±1,2	3,0±0,2	53,6±3,0	85,2±3,9	4,8±6,4	20,5±0,9	28,0±3,2
100%-ный минеральный р-р	28,3±1,7	9,9±1,2	76,1±9,1	3,3±0,2	2,4±1,0	3,1±0,1	83,0±10,8	71,3±8,3	6,6±11,5	56,7±0,4	31,5±5,8
50%-ный минеральный р-р	27,2±2,3	10,1±1,2	72,8±7,7	3,0±0,3	2,9±0,9	3,8±0,1	70,3±9,8	55,7±4,6	7,5±4,7	58,3±0,6	33,5±4,2
50%-ный минеральный р-р + ФК	31,1±3,4	10,4±1,2	74,9±6,8	2,0±0,1	2,7±1,3	3,6±0,1	70,3±9,8	63,6±2,1	4,7±6,0	75,2±0,2	36,4±5,8

Рис. 3. Биомасса растений салата Афицион, выращенных на гидропонной установке в разных вариантах опыта

Fig. 3. Biomass of Aficion lettuce plants grown in a hydroponic setup in different experimental variants

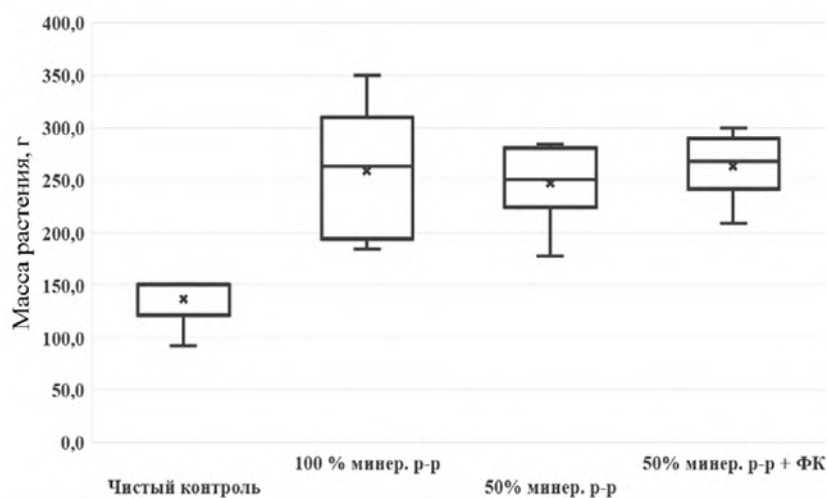


Таблица 4. Результаты Anova и HSD-теста для каждого элемента по вариантам опыта с выращиванием салата Афицион

Table 4. Results of Anova and HSD test for each element for the variants of the experiment with growing Aficion lettuce

Элемент (вариант)	1	2	3	4	5	6
микроэлементы						
N	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,112	0,003	0,001
P	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,891	0,021	0,013
K	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,754	0,452	0,621
мезоэлементы						
Ca	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,781	0,452	0,521
Mg	0,112	0,045	0,032	0,754	0,891	0,621
S	0,245	0,874	0,018	0,011	0,003	0,002
микроэлементы						
Fe	0,001	0,021	0,005	0,112	0,089	0,987
Zn	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,452	0,001	< 0,001
B	0,003	< 0,001	< 0,001	0,045	0,001	0,012

Примечание: 1 — Контроль — 100 % минер. р-р; 2 — Контроль — 50 % минер. р-р; 3 — Контроль — 50 % минер. р-р + ФК; 4 — 100 % минер. р-р — 50 % минер. р-р; 5 — 100 % минер. р-р — 50 % минер. р-р + ФК; 6 — 50 % минер. р-р — 50 % минер. р-р + ФК.

Контрольная группа растений накапливала кальция больше, чем варианты с удобрениями ($p < 0,001$), что можно объяснить эффектом разбавления, за счет быстрого роста растений и синтеза новых тканей. Элемент просто не успевает поступать в молодые листья. Это может быть связано с дисфункцией кальмодулинзависимых путей и антагонизмом с аккумуляцией калия. Механизм их транспортировки по растению различен, однако оба элемента имеют положительный заряд, поэтому в определенной степени могут конкурировать друг с другом.

Кальций играет важную роль в общем развитии растений, поскольку он является структурным компонентом клеточной стенки, участвующим в регуляции ферментов и передаче сигналов при делении клеток. Поэтому недостаток его накопления может приводить к уменьшению синтеза первичных продуктов фотосинтеза, таких как глюкоза и фруктоза. В листовых овощах эти растворимые сахара отвечают за вкус.

Варианты с минеральным фоном увеличивают аккумуляцию железа и магния. Добавка ФК не усиливала данный эффект. Она снижала концентрацию накопления серы за счет конкуренции с органическим лигандом, зато на варианте «50%-ный минеральный р-р + ФК» наблюдали значительное накопление азота, фосфора, цинка и бора ($p < 0,01$).

Поскольку в своем составе ФК содержит менее 1% азота, можно предположить, что его усвоение в биомассе происходит путем опосредованного влияния. Не исключено, что некоторые молекулы в ФК способны проявлять ауксинподобные эффекты, положительно влияющие на метаболизм азота у высших растений.

По сравнению с минеральными удобрениями органические удобрения облают пролонгированным эффектом действия, в результате чего азот постепенно высвобождается из среды и лучше усваивается биомассой. Еще из особенностей дополнительного внесения ФК в 50%-ный раствор Хогланда можно отметить уменьшение концентрации серы в побегах.

Загружая данные в нейросеть, молярные концентрации химических элементов в растениях можно расположить во фрактальный ряд чисел, в котором числа располагаются в порядке монотонного уменьшения их значений (рис. 5).

Среди возможных форм фрактальных профилей химических элементов выделяется особая, степенная форма фрактального профиля, соответствующая геометрическому цифровому ряду (например, 0,1, 0,01, 0,001)⁹. Был выбран степенной

Рис. 4. Диаграммы суммарного накопления макро- (а), мезо- (б) и микроэлементов (в) в побегах салата-латука по вариантам опыта

Fig. 4. Diagrams of the total accumulation of macro- (a), meso- (b) and microelements (b) in lettuce shoots according to experimental variants

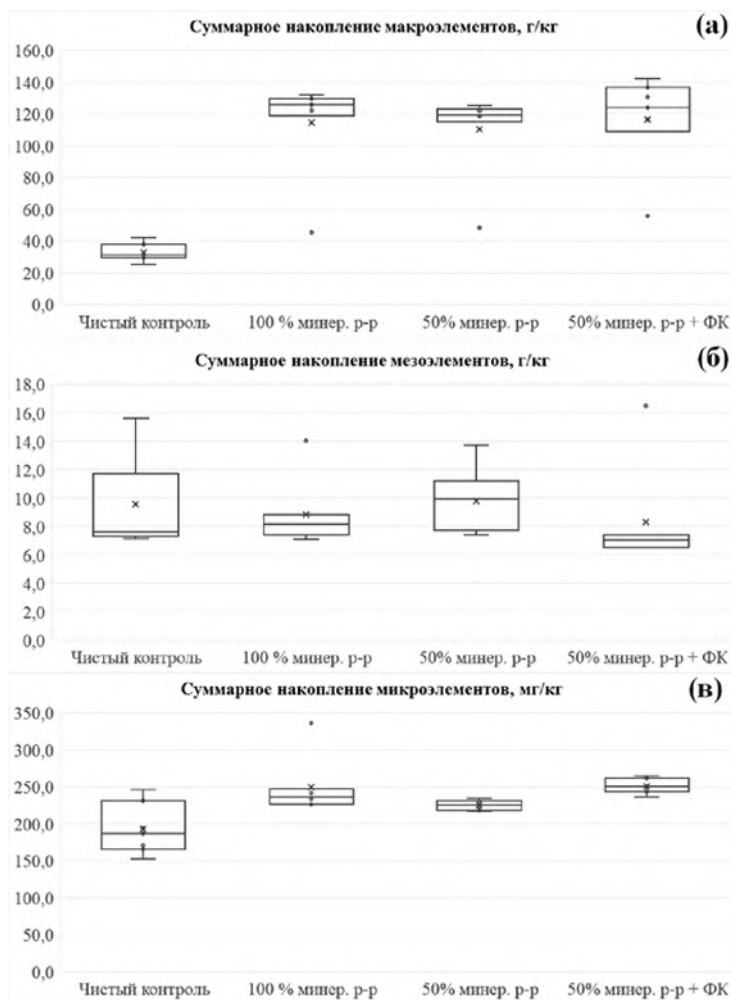
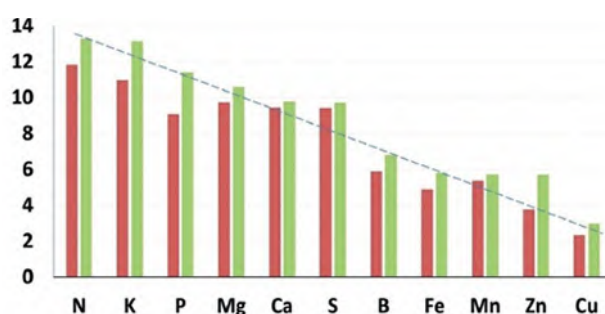


Рис. 5. Фрактальные профили химических элементов, содержащихся в общей зеленой биомассе растений, выращенных в контрольном варианте опыта (красные столбцы) и в варианте с удобрениями (50%-ный минеральный раствор ФК, зеленые столбцы). По Y-оси отложены значения логарифма $\ln(1000 \text{ NM})$, где NM — молярное количество химических элементов. Пунктирная линия соответствует степенной фрактальной модели профиля химических элементов

Fig. 5. Fractal profiles of chemical elements contained in the total green biomass of plants grown in the control variant of the experiment (red bars) and in the variant with fertilizers (50% mineral solution and fulvic acid, green bars). The Y-axis shows the values of the logarithm $\ln(1000 \text{ NM})$, where NM is the molar amount of chemical elements. The dotted line corresponds to the power fractal model of the profile of chemical elements



фрактальный профиль химических элементов в качестве опорного базиса, относительно которого предполагается рассчитывать величину отклонения фактических фрактальных профилей химических элементов от степенного фрактального профиля. Отсутствие отклонений фактического фрактального профиля химических элементов в растениях от степенного профиля связываем с наличием наилучших агроэкологических условий выращивания растений.

Нейросеть ChemNN рассчитывает величину этого отклонения и трансформирует ее обратным преобразованием в индексы CSlelem1, CSlelem2, CSlelem3 (табл. 5), представляющие интенсивности биохимических процессов накопления макроэлементов, мезоэлементов и микроэлементов в растениях.

В результате нейросетевых вычислений было обнаружено, что только значения индекса CSlelem2, представляющего интенсивность накопления мезоэлементов (Mg, Ca и S) в растениях, во всех опытных вариантах были ниже, чем в контрольном варианте.

Из этого следует, что удобрительная схема выращивания салата должна быть скорректирована с учетом дополнительного введения данных элементов в питательный раствор. Особенно это касается кальция.

Выводы/Conclusions

В отличие от почвы, закрытые условия гидропонной сити-фермы обеспечивают рациональное использование воды и растворенных в ней питательных веществ. Эффективное управление режимом питания и снижение сорбционного эффекта минимизируют потери удобрений и негативное воздействие на окружающую среду.

Общепризнанно, что органические стимуляторы в виде гумусовых кислот могут повышать урожайность растений [38], но их эффективность

Таблица 5. Фрактальные профили химических элементов в биомассе растений салата по вариантам опыта

Table 5. Fractal profiles of chemical elements in the biomass of lettuce plants according to experimental variants

Варианты опыта (индекс)	Контроль	100%-ный минеральный р-р	50%-ный минеральный р-р	50%-ный минеральный р-р + ФК
CSlelem1, SE ± 0,1	2,0	6,8	6,6	6,9
CSlelem2, SE ± 0,1	7,7	2,8	5,1	4,5
CSlelem3, SE ± 0,1	2,0	6,8	6,6	6,9

Примечание: индексы CSlelem1, CSlelem2, CSlelem3 рассчитаны нейросетью в отношении интенсивности суммарного накопления следующих групп химических элементов: CSlelem1 — N, P, K; CSlelem2 — Mg, Ca, S; CSlelem3 — B, Fe, Mn, Zn, Cu.

варьируется и не всегда предсказуемо, что требует повышенной точности при определении их дозировки. В проведенном исследовании показано, что добавкой ФК в концентрации 90 млн⁻¹ позволяет повысить интенсивность усвоения неорганических ионов из обедненного вдвое питательного раствора Хогланда.

Нейросети позволяют извлекать ранее недоступную информацию из физиологических и биохимических данных.

В настоящем исследовании была получена информация об интенсивности масс-накопительных и биохимических процессов, проходящих в растениях. Значения рассчитанных индексов когнитивной значимости цифровых данных предоставляют возможность количественного сравнения вариантов удобрительных методик и выбирать те агротехнологии, которые обеспечивают ускоренное и полноценное развитие растений.

Проведенные расчеты показали увеличение уровня когерентности (закрепления) биогенных макро- и микроэлементов в листовой зелени салата при обогащении 50% питательной среды ФК. Относительно уменьшения показателя индекса накопления мезоэлементов можно сделать вывод о необходимости корректирования здесь удобрительной смеси с учетом дополнительного введения в жидкую среду солей Ca и S или использованием внекорневых подкормок.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Godfray H.C.J. *et al.* Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*. 2010; 327(5967): 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- Жильцова М.С., Кузнецова О.А., Кудинов Б.Б., Мельников А.Р. Сити-фермы как перспективное направление развития «городского» бизнеса. *Естественно-гуманитарные исследования*. 2024; (2): 113–119. <https://www.elibrary.ru/oqppzp>
- Дмитриева А.С. Вертикальные фермы — новая тенденция в сельском хозяйстве. *ХроноЭкономика*. 2019; (6): 35–38. <https://www.elibrary.ru/kkyhpd>

⁹ Schroeder M. *Fractals, Chaos, Power Laws: Minutes from an Infinite Paradise*. NY: Dover Publications. 2009; 448.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

FUNDING

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (registration numbers of research topics: FGUS 2024-0010 and FGUS 2025-0005).

REFERENCES

- Godfray H.C.J. *et al.* Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*. 2010; 327(5967): 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- Zhil'tsova M.S., Kuznetsova O.A., Kudinov B.B., Melnikov A.R. City farms as a promising direction for the development of "urban" business. *Natural-Humanitarian Studies*. 2024; (2): 113–119 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/oqppzp>
- Dmitrieva A.S. Vertical farms are a new trend in agriculture. *HronoEconomics*. 2019; (6): 35–38 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/kkyhpd>

4. Ерохин М.Н., Скороходов Д.М., Скороходова А.Н., Анисимов А.А., Потемкин Р.А. Анализ современных устройств выращивания растений в городском фермерстве и перспективы его развития. *Агроинженерия*. 2021; (3): 24–31. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-3-24-31>
5. Santos P.J.A., Ocampo E.T.M. SNAP hydroponics: Development & potential for urban vegetable production. *Philippine Journal of Crop Science*. 2005; 30(2): 3–11.
6. Sardare M.D., Admane S.V. A Review on Plant Without Soil — Hydroponics. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013; 2(3): 299–304. <https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0203013>
7. Putra P.A., Yuliando H. Soilless Culture System to Support Water Use Efficiency and Product Quality: A Review. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015; 3: 283–288. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.01.054>
8. De Souza P.F. et al. Physiological differences of Crocantela lettuce cultivated in conventional and hydroponic systems. *Horticultura Brasileira*. 2019; 37(1): 101–105. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620190116>
9. Козлова А.В. Вертикальные фермы — новая тенденция в сельском хозяйстве. *Молодежь и наука*. 2021; (8): 18. <https://www.elibrary.ru/mffxgz>
10. Пинчук Е.В., Беспалко Л.В., Козарь Е.Г., Балашова И.Т., Сирота С.М., Шевченко Т.Е. Ценная овощная зелень на гидропонике для круглогодичного потребления. *Овощи России*. 2019; (3): 45–53. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-3-45-53>
11. Qadeer A. et al. Hydroponics as an innovative technique for lettuce production in greenhouse environment. *Pure and Applied Biology*. 2020; 9(1): 20–26. <https://doi.org/10.19045/bspab.2020.90130>
12. Лебедева А.Т. Салаты. М.: МСП. 2004; 153. ISBN 5-7578-0203-0 <https://www.elibrary.ru/qkvwhn>
13. Sapkota S., Sapkota S., Liu Z. Effects of Nutrient Composition and Lettuce Cultivar on Crop Production in Hydroponic Culture. *Horticulturae*. 2019; 5(4): 72. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040072>
14. Sronsri C., Sittipol W., U-yen K. Quantity and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown by a circulating hydroponic method with a Halbach array magnetizer. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2022; 108: 104460. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104460>
15. Солдатенко А.В. и др. Проблемы производства салата в открытом грунте и особенности его выращивания в условиях мелкотоварного производства (на примере ООО «Веселый агроном» Дмитровского района Московской области). *Овощи России*. 2018; (2): 55–60. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-2-55-60>
16. Иванова М.И., Кашлева А.И., Алексеева К.Л., Давлетбаева О.Р. Салат: многообразие разновидностей и сортов. *Картофель и овощи*. 2017; (5): 22–24. <https://www.elibrary.ru/yndazt>
17. Иванова М.И., Сурихина Т.Н. Размер и тенденции роста рынка салата. *Картофель и овощи*. 2024; (2): 20–25. <https://doi.org/10.25630/PAV.2024.50.64.001>
18. Старых Г.А., Хаустова Н.А. Технология выращивания салата на примере ЗАО «Агрокомбинат “Московский”». *Вестник Российского государственного аграрного заочного университета*. 2015; 18: 9–14. <https://www.elibrary.ru/vdmahl>
19. Олива Т.В., Манокхина Л.А., Кузьмина Е.А., Проскурина Е.Н. Листовой салат сорта Афicion в защищенном грунте. *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2019; (4): 235–244. <https://www.elibrary.ru/ihlhwo>
20. Solis E.S., Gabutan J.U. Hydroponic Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *Lalique*) Production Using Commercially Available Nutrient Solutions. *International Journal of Agriculture and Environmental Research*. 2023; 9(3): 330–341. <https://doi.org/10.51193/IJAER.2023.9306>
21. Barbosa G.L. et al. Comparison of Land, Water, and Energy Requirements of Lettuce Grown Using Hydroponic vs. Conventional Agricultural Methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015; 12(6): 6879–6891. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>
22. Ahmed Z.F.R., Alnuaimi A.K.H., Askri A., Tzortzakos N. Evaluation of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Production under Hydroponic System: Nutrient Solution Derived from Fish Waste vs. Inorganic Nutrient Solution. *Horticulturae*. 2021; 7(9): 292. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090292>
23. Shahein M.M., Afifi M.M., Algharib A.M. Assessing the Effect of Humic Substances Extracted from Compost and Biogas Manure on Yield and Quality of Lettuce (*Lactuca sativa* L.). *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*. 2014; 14(10): 996–1009.
24. Guilayn F., Benbrahim M., Rouez M., Crest M., Patureau D., Jimenez J. Humic-like substances extracted from different digestates: First trials of lettuce biostimulation in hydroponic culture. *Waste Management*. 2020; 104: 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.025>
4. Erokhin M.N., Skorokhodov D.M., Skorokhodova A.N., Anisimov A.A., Potemkin R.A. Analysis of using modern plant cultivation units in city farming and its development prospects. *Agricultural Engineering*. 2021; (3): 24–31 (in Russian). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-3-24-31>
5. Santos P.J.A., Ocampo E.T.M. SNAP hydroponics: Development & potential for urban vegetable production. *Philippine Journal of Crop Science*. 2005; 30(2): 3–11.
6. Sardare M.D., Admane S.V. A Review on Plant Without Soil — Hydroponics. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013; 2(3): 299–304. <https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0203013>
7. Putra P.A., Yuliando H. Soilless Culture System to Support Water Use Efficiency and Product Quality: A Review. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015; 3: 283–288. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.01.054>
8. De Souza P.F. et al. Physiological differences of Crocantela lettuce cultivated in conventional and hydroponic systems. *Horticultura Brasileira*. 2019; 37(1): 101–105. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620190116>
9. Kozlova A.V. Vertical farms are a new trend in agriculture. *Youth and Science*. 2021; (8): 18 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/mffxgz>
10. Pinchuk E.V., Bepalko L.V., Kozar E.G., Balashova I.T., Sirota S.M., Shevchenko T.E. Valuable vegetable green on hydroponics for seasonal use. *Vegetable crops of Russia*. 2019; (3): 45–53 (in Russian). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-3-45-53>
11. Qadeer A. et al. Hydroponics as an innovative technique for lettuce production in greenhouse environment. *Pure and Applied Biology*. 2020; 9(1): 20–26. <https://doi.org/10.19045/bspab.2020.90130>
12. Lebedeva A.T. Salads. Moscow: MSP. 2004; 153 (in Russian). ISBN 5-7578-0203-0 <https://www.elibrary.ru/qkvwhn>
13. Sapkota S., Sapkota S., Liu Z. Effects of Nutrient Composition and Lettuce Cultivar on Crop Production in Hydroponic Culture. *Horticulturae*. 2019; 5(4): 72. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040072>
14. Sronsri C., Sittipol W., U-yen K. Quantity and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown by a circulating hydroponic method with a Halbach array magnetizer. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2022; 108: 104460. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104460>
15. Soldatenko A.V. et al. Problems of lettuce production in open ground and peculiarities of his growing in conditions of small-manufacture production (on the example of LLC “Vesely agronom” Dmitrovskiy district of Moscow region). *Vegetable crops of Russia*. 2018; (2): 55–60 (in Russian). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-2-55-60>
16. Ivanova M.I., Kashleva A.I., Alekseeva K.L., Davletbayeva O.R. Lettuce [sic!]: diversity of variants and cultivars. *Potato and vegetables*. 2017; (5): 22–24 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/yndazt>
17. Ivanova M.I., Surikhina T.N. The size and growth trends of the leafy vegetable market. *Potato and vegetables*. 2024; (2): 20–25 (in Russian). <https://doi.org/10.25630/PAV.2024.50.64.001>
18. Starykh G.A., Khaustova N.A. Technology of growing lettuce on the example of ZAO «Agrokombinat “Moskovsky”». *Herald of Russian State Agrarian Correspondence University*. 2015; 18: 9–14 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/vdmahl>
19. Oliva T.V., Manokhina L.A., Kuzmina E.A., Proskurina E.N. Lettuce of the variety Aficion in the greenhouse. *Innovations in agricultural complex: problems and perspectives*. 2019; (4): 235–244 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ihlhwo>
20. Solis E.S., Gabutan J.U. Hydroponic Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *Lalique*) Production Using Commercially Available Nutrient Solutions. *International Journal of Agriculture and Environmental Research*. 2023; 9(3): 330–341. <https://doi.org/10.51193/IJAER.2023.9306>
21. Barbosa G.L. et al. Comparison of Land, Water, and Energy Requirements of Lettuce Grown Using Hydroponic vs. Conventional Agricultural Methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015; 12(6): 6879–6891. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>
22. Ahmed Z.F.R., Alnuaimi A.K.H., Askri A., Tzortzakos N. Evaluation of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Production under Hydroponic System: Nutrient Solution Derived from Fish Waste vs. Inorganic Nutrient Solution. *Horticulturae*. 2021; 7(9): 292. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090292>
23. Shahein M.M., Afifi M.M., Algharib A.M. Assessing the Effect of Humic Substances Extracted from Compost and Biogas Manure on Yield and Quality of Lettuce (*Lactuca sativa* L.). *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*. 2014; 14(10): 996–1009.
24. Guilayn F., Benbrahim M., Rouez M., Crest M., Patureau D., Jimenez J. Humic-like substances extracted from different digestates: First trials of lettuce biostimulation in hydroponic culture. *Waste Management*. 2020; 104: 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.025>

25. Скугорева С.Г., Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я., Сырчина Н.В. Влияние гуминовых удобрений на ростовые и биохимические показатели растений салата. *Бутлеровские сообщения*. 2020; 64(11): 108–115. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/20-64-11-108>
26. Удалова О.Р., Мирская Г.В., Конончук П.Ю., Панова Г.Г. О влиянии растворов фульвокислот из сапропеля на растения салата при различных видах его обработки. *Аграрный вестник Урала*. 2021; (6): 22–33. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-209-06-22-33>
27. Долгих П.П., Трепиз С.В., Попова Н.М. Роль спектральных характеристик источников излучения в формировании урожая салата при выращивании методом гидропонии. *Агроинженерия*. 2023; 25(5): 62–67. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-62-67>
28. Noh K., Jeong B.R. Optimizing Temperature and Photoperiod in a Home Cultivation System to Program Normal, Delayed, and Hastened Growth and Development Modes for Leafy Oak-Leaf and Romaine Lettuces. *Sustainability*. 2021; 13(19): 10879. <https://doi.org/10.3390/su131910879>
29. Loconsole D., Cocetta G., Santoro P., Ferrante A. Optimization of LED Lighting and Quality Evaluation of Romaine Lettuce Grown in An Innovative Indoor Cultivation System. *Sustainability*. 2019; 11(3): 841. <https://doi.org/10.3390/su11030841>
30. Senila M. Recent Advances in the Determination of Major and Trace Elements in Plants Using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry. *Molecules*. 2024; 29(13): 3169. <https://doi.org/10.3390/molecules29133169>
31. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*. 2015; 61: 85–117. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003>
32. Погодаев А.К., Хабибуллина Е.Л., Инютин Д.М. Применение нейросетевых моделей для построения продукционных правил экспертных систем. *Прикладная математика и вопросы управления*. 2021; (2): 73–92. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2021.2.05>
33. Widrow B., Greenblatt A., Kim Y., Park D. The No-Prop algorithm: A new learning algorithm for multilayer neural networks. *Neural Networks*. 2013; 37: 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2012.09.020>
34. Sutrop U. List Task and a Cognitive Saliency Index. *Field Methods*. 2001; 13(3): 263–276. <https://doi.org/10.1177/1525822X0101300303>
35. Mascarenhas W.F. Fast and accurate normalization of vectors and quaternions. *Computational and Applied Mathematics*. 2018; 37(4): 4649–4660. <https://doi.org/10.1007/s40314-018-0594-6>
36. Nikolić D., Mureşan R.C., Feng W., Singer W. Scaled correlation analysis: a better way to compute a cross-correlogram. *European Journal of Neuroscience*. 2012; 35(5): 742–762. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2011.07987.x>
37. Дюк В.А., Флегонтов А.В., Фомина И.К. Применение технологий интеллектуального анализа данных в естественно-научных, технических и гуманитарных областях. *Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена*. 2011; 138: 77–84. <https://www.elibrary.ru/ndnwej>
38. Rose M.T., Patti A.F., Little K.R., Brown A.L., Jackson W.R., Cavagnaro T.R. A Meta-Analysis and Review of Plant-Growth Response to Humic Substances: Practical Implications for Agriculture. *Advances in Agronomy*. 2014; 124: 37–89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800138-7.00002-4>
25. Skugoreva S.G., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya., Syrchina N.V. Influence of humic fertilizers on growth and biochemical parameters of lettuce plants. *Butlerov Communications*. 2020; 64(11): 108–115 (in Russian). <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/20-64-11-108>
26. Udalova O.R., Mirskaya G.V., Kononchuk P.Yu., Panova G.G. About the influence of solutions of fulvic acids from sapropel on lettuce plants in various types of its processing. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021; (6): 22–33 (in Russian). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-209-06-22-33>
27. Dolgikh P.P., Trepuz S.V., Popova N.M. Role of the spectral characteristics of radiating sources in the formation of lettuce yield in hydroponics cultivation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023; 25(5): 62–67 (in Russian). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-62-67>
28. Noh K., Jeong B.R. Optimizing Temperature and Photoperiod in a Home Cultivation System to Program Normal, Delayed, and Hastened Growth and Development Modes for Leafy Oak-Leaf and Romaine Lettuces. *Sustainability*. 2021; 13(19): 10879. <https://doi.org/10.3390/su131910879>
29. Loconsole D., Cocetta G., Santoro P., Ferrante A. Optimization of LED Lighting and Quality Evaluation of Romaine Lettuce Grown in An Innovative Indoor Cultivation System. *Sustainability*. 2019; 11(3): 841. <https://doi.org/10.3390/su11030841>
30. Senila M. Recent Advances in the Determination of Major and Trace Elements in Plants Using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry. *Molecules*. 2024; 29(13): 3169. <https://doi.org/10.3390/molecules29133169>
31. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*. 2015; 61: 85–117. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003>
32. Pogodaev A.K., Khabibullina E.L., Inyutin D.M. Applying neural network models to the construction of production rules expert systems. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2021; (2): 73–92 (in Russian). <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2021.2.05>
33. Widrow B., Greenblatt A., Kim Y., Park D. The No-Prop algorithm: A new learning algorithm for multilayer neural networks. *Neural Networks*. 2013; 37: 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2012.09.020>
34. Sutrop U. List Task and a Cognitive Saliency Index. *Field Methods*. 2001; 13(3): 263–276. <https://doi.org/10.1177/1525822X0101300303>
35. Mascarenhas W.F. Fast and accurate normalization of vectors and quaternions. *Computational and Applied Mathematics*. 2018; 37(4): 4649–4660. <https://doi.org/10.1007/s40314-018-0594-6>
36. Nikolić D., Mureşan R.C., Feng W., Singer W. Scaled correlation analysis: a better way to compute a cross-correlogram. *European Journal of Neuroscience*. 2012; 35(5): 742–762. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2011.07987.x>
37. Dyuk V.A., Flegontov A.V., Fomina I.C. Application of data mining technologies in the natural sciences, engineering and humanities. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*. 2011; 138: 77–84 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ndnwej>
38. Rose M.T., Patti A.F., Little K.R., Brown A.L., Jackson W.R., Cavagnaro T.R. A Meta-Analysis and Review of Plant-Growth Response to Humic Substances: Practical Implications for Agriculture. *Advances in Agronomy*. 2014; 124: 37–89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800138-7.00002-4>

ОБ АВТОРАХ

Николай Иванович Воробьев¹

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
nik.ivanvorobyov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8300-2287>

Ян Викторович Пухальский²

научный сотрудник
puhalskyan@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5233-3497>

Святослав Игоревич Лоскутов²

кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией промышленных биотехнологических инноваций
lislosh@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8102-2900>

Андрей Васильевич Бабыка³

генеральный директор
89036257549@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-8794-3494>

Алла Ивановна Якубовская⁴

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель отдела сельскохозяйственной микробиологии
yakubovskaya_alla@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-8434-2689>

ABOUT THE AUTHORS

Nikolay Ivanovich Vorobyov¹

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher
nik.ivanvorobyov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8300-2287>

Jan Viktorovich Puhalsky²

Research Associate
puhalskyan@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5233-3497>

Svyatoslav Igorevich Loskutov²

Candidate of Agricultural Sciences, Head of the Laboratory of Industrial Biotechnological Innovations
lislosh@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8102-2900>

Andrey Vasilyevich Babyka³

General Manager
89036257549@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-8794-3494>

Alla Ivanovna Yakubovskaya⁴

Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Head of the Department of Agricultural Microbiology
yakubovskaya_alla@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-8434-2689>

Ирина Алексеевна Каменева⁴

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией физиологии и экологии микроорганизмов
 irina.kameneva.7@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3914-7184>

Анатолий Иванович Осипов⁵

доктор сельскохозяйственных биологических наук, профессор, главный научный сотрудник
 aosipov2006@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-3181-3792>

Валерия Романовна Турковская³

инженер-исследователь
 liatolani@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-8854-0461>

Владимир Викторович Космин⁶

инженер-исследователь
 jankiss88@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0000-2274-2265>

Михаил Павлович Сакович⁶

генеральный директор
 jankiss88@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-5429-669X>

¹ Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, шоссе Подбельского, 3, Пушкин, Санкт-Петербург, 196608, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок — филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, Литейный пр-т, 55, Санкт-Петербург, 191014, Россия

³ ООО «Фарморганик», Богатырский пр-т, 60, корп. 3, литера А, кв. 42, Санкт-Петербург, 197082, Россия

⁴ Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, ул. Киевская, 150, Симферополь, 295453, Россия

⁵ Агрофизический научно-исследовательский институт, Гражданский пр-т, 14, Санкт-Петербург, 195220, Россия

⁶ ООО Organic farm Green Punch, Валдайская ул., 9, Санкт-Петербург, 196624, Россия

Irina Alekseevna Kameneva⁴

Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Physiology and Ecology of Microorganisms
 irina.kameneva.7@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3914-7184>

Anatoly Ivanovich Osipov⁵

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Scientific Officer
 aosipov2006@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-3181-3792>

Valeria Romanovna Turkovskaya³

Research Engineer
 liatolani@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-8854-0461>

Vladimir Viktorovich Kosmin⁶

Research Engineer
 jankiss88@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0000-2274-2265>

Mikhail Pavlovich Sakovich⁶

General Manager
 jankiss88@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-5429-669X>

¹ All-Russian Research Institute of Agricultural Microbiology, 3 Podbelskogo Highway, Pushkin, Saint Petersburg, 196608, Russia

² The All-Russian Scientific Research Institute of Food Additives is a branch of the V.M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences, 55 Liteyny Ave., Saint Petersburg, 191014, Russia

³ LLC "Farmorganik", 60A Bogatyrsky Ave., buldging 3, apartment 42, Saint Petersburg, 197082, Russia

⁴ Scientific Research Institute of Agriculture of Crimea, 150 Kievskaya Str., Simferopol, 295453, Russia

⁵ Agrophysical Research Institute, 14 Grazhdansky Ave., Saint Petersburg, 195220, Russia

⁶ LLC "Organic farm Green Punch", 9 Valdayskaya Str., Saint Petersburg, 196624, Russia

ПРОДУКТЫ

ИННОВАЦИИ

УСЛУГИ

ЛОГИСТИКА

МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ B2B
ВЫСТАВКА

**GLOBAL FRESH
MARKET:
VEGETABLES
& FRUITS**

**11-13 НОЯБРЯ 2025**

Гостиный Двор, Москва

Контакты

+7 (495) 481-29-19



business@gfmexpo.com



www.gfmexpo.com

РЕКЛАМА

Соорганизатор

национальный
ПЛОДОВООЩНОЙ СОЮЗ

При поддержке



**Global Fresh
MARKET**

Полный цикл производства «от поля до прилавка» на единой площадке

Прямой диалог с ключевыми игроками рынка

Обширная деловая программа с участием экспертов мирового уровня:

110+приглашенных
спикеров**30**отраслевых мероприятий
по овощеводству и садоводству

Конкурс студенческих работ для молодых специалистов в АПК



Реклама