ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2487
https://elibrary.ru/LDPNKY

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Нейросетевой анализ влияния внешних факторов на микроэлементный профиль и биомассу микрозелени *Brássica júncea* L.

Я. В. Пухальский[1,*], Н. И. Воробьев[2], С. И. Лоскутов[1], М. А. Чукаева[3], Р. И. Глушаков[4,5], А. В. Бабыка[6], Д. Д. Мещеряков[7], А. И. Якубовская[8]

[1] *Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, Пушкин, Россия*
[3] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[4] *Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия*
[5] *Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия*
[6] *ООО «Фарморганик», Санкт-Петербург, Россия*
[7] *ООО «Led for Plant», Красноярск, Россия*
[8] *Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия*

Поступила в редакцию: 26.04.2023
Принята после рецензирования: 29.05.2023
Принята к публикации: 04.06.2023

**Я. В. Пухальский: puhalskyyan@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5233-3497*
Н. И. Воробьев: https://orcid.org/0000-0001-8300-2287
С. И. Лоскутов: https://orcid.org/0000-0002-8102-2900
М. А. Чукаева: https://orcid.org/0000-0003-3643-6757
Р. И. Глушаков: https://orcid.org/0000-0002-0161-5977
А. В. Бабыка: https://orcid.org/0009-0005-8794-3494
Д. Д. Мещеряков: https://orcid.org/0009-0005-0382-8457
А. И. Якубовская: https://orcid.org/0000-0001-8434-2689

© Я. В. Пухальский, Н. И. Воробьев, С. И. Лоскутов, М. А. Чукаева, Р. И. Глушаков, А. В. Бабыка, Д. Д. Мещеряков, А. И. Якубовская, 2024

Аннотация.
Выращивание органической микрозелени в искусственной среде сопряжено с разработкой унифицированного технологического регламента, который сочетает в себе возможности использования различных внешних биотических и абиотических элиситоров для получения здоровой рассады. Качество рассады зависит от сбалансированного накопления в ней эссенциальных микроэлементов. Целью исследования являлась оценка изменения нутриентного профиля микрозелени на примере горчицы сарептской сорта Ника с помощью методики фрактального расчета повторяющихся числовых рядов.
Эксперимент проводили в закрытом гроубоксе (15 суток) в условиях агрегатопоники при интенсивной 16 часовой светокультуре (440 мкмоль/м^2·с). Для инокуляции растений применяли эндомикоризный гриб *Glomus mosseae*. В качестве стабилизирующей органической добавки при введении в корнеобитаемую среду (кокосовый субстрат) использовали раствор фульвокислот в концентрации 100 мг/л. Для физической обработки применяли статическое воздействие слабого электромагнитного поля с преобладанием магнитной индукции в 20 мТл. Элементный анализ проводили методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ICPE-9000 (Shimadzu, Япония).
По расчетным индексам биокомпозиции микроэлементов лучший результат был диагностирован для варианта применения фульвокислот и слабого электромагнитного поля ($IndBcom_L$ = 0,27). Биомасса сухого порошка на элементный анализ составила 10,2 г. Это почти в 2 раза превышало значения, полученные на контроле, без сторонних воздействий (5,2 г). Все варианты с микоризацией не оказали положительного действия на степень консолидации общего пула микроэлементов на данном сроке вегетации культуры. Прибавка по биомассе составила 20 %.
Примененный нейросетевой анализ соотношения микроэлементов в полученной микрозелени можно рассматривать как математическую модель для биохимической диагностики качества получаемой биомассы и выбора лучших условий для дальнейшего биотехнологического процесса возделывания других культур в искусственной среде при минимизации использования минеральных удобрений в пользу органо-бактериального комплекса.

Ключевые слова. Микрозелень, горчица, *Brássica júncea* L., микроэлементы, биотические факторы, абиотические факторы, светокультура, фульвокислоты, магнитооблучение, микориза

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) (темы FGUS 2022-0017 и FGUS 2022-0018).

Для цитирования: Нейросетевой анализ влияния внешних факторов на микроэлементный профиль и биомассу микрозелени *Brássica júncea* L. / Я. В. Пухальский [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 48–59. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2487

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2487
https://elibrary.ru/LDPNKY

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Effect of External Factors on Trace Element Profile and Biomass of Mustard (*Brássica júncea* L.) Microgreens: Neural Network Analysis

Yan V. Puhalsky[1,*], Nikolai I. Vorobyov[2], Svyatoslav I. Loskutov[1], Mariia A. Chukaeva[3], Ruslan I. Glushakov[4,5], Andrew V. Babyka[6], Denis D. Meshcheriakov[7], Alla I. Yakubovskaya[8]

[1] *All-Russian Research Institute for Food Additives, Saint Petersburg, Russia*
[2] *All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, Pushkin, Russia*
[3] *Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia*
[4] *S.M. Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia*
[5] *St. Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia*
[6] *"Pharmorganic" LLC, Saint Petersburg, Russia*
[7] *"Led for Plant" LLC, Krasnoyarsk, Russia*
[8] *Scientific Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia*

Received: 26.04.2023
Revised: 29.05.2023
Accepted: 04.06.2023

**Yan V. Puhalsky: puhalskyyan@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5233-3497*
Nikolai I. Vorobyov: https://orcid.org/0000-0001-8300-2287
Svyatoslav I. Loskutov: https://orcid.org/0000-0002-8102-2900
Mariia A. Chukaeva: https://orcid.org/0000-0003-3643-6757
Ruslan I. Glushakov: https://orcid.org/0000-0002-0161-5977
Andrew V. Babyka: https://orcid.org/0009-0005-8794-3494
Denis D. Meshcheriakov: https://orcid.org/0009-0005-0382-8457
Alla I. Yakubovskaya: https://orcid.org/0009-0001-8434-2689

© Ya.V. Puhalsky, N.I. Vorobyov, S.I. Loskutov, M.A. Chukaeva, R.I. Glushakov, A.V. Babyka, D.D. Meshcheriakov, A.I. Yakubovskaya, 2024

Abstract.
Growing organic microgreens indoors requires a unified technological procedure with various external elicitors. The quality of seedlings depends on their ability to accumulate essential microelements. This research assessed the nutrient profile of mustard microgreens using the method of fractal calculation with repeating numerical series.
The experiment involved mustard (*Brássica júncea* L.) of the Nika variety grown in a closed box for 15 days under aggregation with an intensive 16-h photocycle (440 µmoL m^2/s). The plants were inoculated with the endomycorrhizal fungus Glomus mosseae. A solution of fulvic acids (100 mg/L) served as a stabilizing organic additive and was introduced into the coconut substrate. The physical treatment included weak static electromagnetic field with magnetic induction (20 mT). The elemental analysis was performed by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry on an ICPE-9000 device (Shimadzu, Japan).
According to the calculated indices of the microelement biocomposition, the best result belonged to the sample treated with fulvic acids and weak electromagnetic field ($IndBcom_L$ = 0.27). The resulting biomass of dry powder for elemental analysis was 10.2 g, which was twice as high as the values obtained in the control sample, not subjected to any external influences (5.2 g). All the variants with mycorrhization produced no positive effect on the total pool of microelements during vegetation. The increase in biomass averaged as low as 20%. Zinc increased by 33.3% while aluminum and iron decreased by 59.5 and 18.0%, respectively.
The neural network analysis of the microelements in mustard microgreens proved effective as a mathematical model for biochemical diagnostics of biomass quality. The method could be used to optimize the biotechnological process for other indoor crops as it makes it possible to partially substitute mineral fertilizers with organic and bacterial complex.

Keywords. Microgreen, mustard, *Brássica júncea* L., microelements, biotic factors, abiotic factors, light culture, fulvic acids, magnetic irradiation, mycorrhiza

Funding. The research was part of state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauki), research topics FGUS 2022-0017 and FGUS 2022-0018.

For citation: Puhalsky YaV, Vorobyov NI, Loskutov SI, Chukaeva MA, Glushakov RI, Babyka AV, *et al.* Effect of External Factors on Trace Element Profile and Biomass of Mustard (*Brássica júncea* L.) Microgreens: Neural Network Analysis. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):48–59. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2487

Введение

В связи с высоким риском глобального неблагоприятного изменения климата, наряду с эрозией почв и растущим спросом на отечественное производство органических продуктов питания, сегодня наблюдается тенденция к созданию внутри городских агломераций хозяйств защищенного грунта (теплиц и вертикальных ферм). Преимущества закрытого хозяйства заключаются в отсутствии зависимости от наличия пахотных угодий и внешних климатических факторов, уменьшении углеродного следа, связанного с транспортировкой продуктов питания из отдаленных регионов, и снижении их конечной себестоимости за счет сокращения логистических издержек. Близость к конечному потребителю позволит круглогодично выращивать молодую рассаду (микрозелень) для быстрой поставки в специализированные магазины и снижать риски развития авитаминоза у жителей северных городов.

Выращивание микрозелени – новое и быстро развивающееся направление в современном бизнесе. Данное направление представляет собой получение на продажу молодой зеленой рассады различных видов овощных, пряно-ароматических, злаковых и бобовых культур, а также дикорастущих трав [1–5]. Благодаря простоте выращивания первым обратил внимание на микрозелень пищевой сектор. Она стала активно использоваться в индустрии правильного питания. С начала 1980-х годов шеф-повара элитных ресторанов в г. Сан-Франциско стали применять ее в кулинарии при создании диетических вегетарианских блюд, а к середине 1990-х микрозелень использовалась по всей Южной Калифорнии [6]. Первые упоминания практического проращивания семян известны еще со времен Древнего Египта [7]. В 2019 г. основным поставщиком на рынки микрозелени являлись США, за ними следовали Канада и Мексика. В США рынок микрозелени сильно фрагментирован. Такие крупные игроки, как Fambox Green LLC, Metro Microgreens, Fresh Origins, Florida microgreens, The Chefs Garden Inc. и Aerofarms LLC намерены продолжать инвестировать в данный функциональный продукт. Ожидается, что к 2027 г. рынок микрозелени в мире будет расти в среднем на 7,5 % в год, а в США на 10,1 %. По мнению маркетологов, из модного тренда в пространстве вегетарианцев микрозелень перейдет на более обширную целевую аудиторию.

Сегодня микрозеленью заинтересовались исследователи из области медицины и здравоохранения. Связано это с пандемией COVID-19, которая изменила представление многих людей о своих потребительских привычках, и переходом на изоляционный и малоподвижный образ жизни [8–10]. По данным исследований 2010 г., опубликованных Колледжом сельского хозяйства и природных ресурсов Университета Мэриленда (AGNR), а также Министерствами сельского хозяйства (USDA) и здравоохранения и социальных служб США (DHHS), разные виды микрозелени от 10 до 50 раз более питательны своих зрелых аналогов [11]. Из-за богатого фитонутриентами состава это делает ее эффективным витаминно-минеральным комплексом в профилактике развития неинфекционных заболеваний. В условиях эпидемиологической обстановки она служит первым барьером в развитии вирусов. Особенно актуально это для лиц пожилого возраста, испытывающих нехватку питательных элементов [12, 13].

Для успешной интеграции микрозелени в глобальный производственный цикл необходимо оптимизировать систему ее выращивания в условиях закрытого грунта. Решающую роль играет сокращение сроков получения зеленой биомассы без ущерба в нужных объемах и нужной питательной ценности. Для повышения конкурентоспособности необходимо искать методы по снижению ее себестоймости и увеличению экологичности. Именно экологичность стала предметом современных исследований. Ученые в своих работах проводят эксперименты по выращиванию микрозелени с использованием вертикального типа земледелия. В качестве технологии для культивирования молодой рассады практикуют методы гидропоники с использованием жидких или твердых нейтральных субстратов [14–16]. Благодаря полному отказу от лимитирующего влияния почв это позволяет точнее проводить оценку степени минерализации и кислотности питательной подложки. Также в данных условиях снижается риск контаминации питательной среды и молодых побегов микотоксинами. Поскольку производственный цикл получения микрозелени короткий и составляет в среднем примерно 15 дней, согласно санитарно-микробиологическому контролю, то она не сильно подвергается атаке вредителей и патогенов в сравнении со взрослыми растениями. Однако при несоблюдении асептических мер гигиены рабочего места во время постановки опыта и дальнейшего ухода за ним полностью исключить возможность заражения рассады нельзя. На примере микрозелени семейства Крестоцветных (*Brassicaceae*) можно проследить, что при плотном посеве семян и отсутствии поверхностной обработки возможно появление корневой гнили, которое вызвано развитием грибной микрофлоры рода *Pythium* [17]. Источник загрязнения сначала возникает в семенах, а затем распространяется на ростки. В исследовании Z. Xiao и др. было показано, что выживаемость и пролиферация бактериальных клеток *Escherichia coli* была выше в системе гидропонного производства в сравнении с системой замещения почвы [18]. При параллельном добавлении в питательную среду минеральных удобрений обработка рассады фунгицидами может отрицательно сказаться на получении органической продукции. Нужно закупать семена, которые прошли санитарную обработку, или самим проводить их предварительную стерилизацию. Традиционно используют обработку 2 % раствором гипохлорита натрия/кальция, хотя возможны комбинированные варианты дезинфекции [19].

Для минимизации или полного отказа от добавления в среду микрозелени химических веществ с целью устранения накопления в ней нитратов ведется поиск среди природных органических источников питания. В качестве альтернативной замены можно использовать биологически активные добавки в виде солей гумусовых кислот, которые активируют прорастание семян при их замачивании в разведенном растворе (гидропраймирование). Из-за наличия в их составе низкомолекулярных соединений и групп ионов, организованных для создания хелатных комплексов, гумусовые кислоты будут способствовать лучшему усвоению рассадой эссенциальных микроэлементов даже при росте на бедных субстратах. Кроме того, в составе данных веществ присутствует фракция фульвокислот, которая имеет высокую общую кислотность, адсорбционные и катионообменные способности, а также высокое число карбоксильных групп в сравнении с фракцией гуминовых кислот. За счет меньших молекулярных размеров и атомной массы (всего несколько сотен Дальтон в сравнении с несколькими тысячами у гуминовых кислот) она способна свободно проникать сквозь микропоры биологических клеточных мембран (плазмолеммы) и передавать растению сигналы без вторичных посредников [20]. Фульвокислоты могут выступать в роли природных хелаторов в мобилизации и транспорте железа и других микроэлементов в растениях [21, 22]. Также фракция обладает биофунгицидными свойствами [23, 24].

При выращивании микрозелени для инокуляции семян необходимо вести отбор среди ассоциативных штаммов ризобактерий, которые обладают антифунгальной активностью, и грибов арбускулярной микоризы. При обработке семян ими (биопраймирование) или добавлении в питательную среду в виде суспензий они будут способствовать росту растений и толерантности к стрессам за счет регуляции водного обмена и лучшего поступления биофильных микроэлементов [25, 26]. Данные микроорганизмы могут применяться как по отдельности, так и в комбинациях, проявляя синергетические и/или аддитивные эффекты. Если влияние включения в субстрат ризобактерий изучено, то о метаболических путях, на которые влияют экохимические взаимодействия грибов и растений, пока известно не так много [27, 28]. При создании стабильных форм коммерческих биопрепаратов на основе данных штаммов соли гумусовых кислот могут использоваться как стабилизирующие питательные добавки в качестве дополнительного источника углерода. В микробном консорциуме они будут использоваться более эффективно, чем чистыми культурами.

Помимо биологического воздействия, на растения можно влиять физически: обработка проростков электромагнитными полями радиочастотного и светового диапазонов [29–33].

В исследованиях среди группы овощной микрозелени используют растения, которые принадлежат к семействами *Brassicaceae*, *Apiaceae*, *Fabaceae* и *Amaranthaceae* [34–36]. Наиболее широким спросом пользуются таксоны горчица сарептской (*Brassica juncea* L.) и мангольда (*Beta vulgaris* L.). Оба вида являются многопрофильными культурами, которые можно эффективно использовать в стратегиях фиторемедиации почв, а также как пищевые приправы и биоактивные добавки в медицине при лечении хронических заболеваний. Среди других изученных видов овощей горчица характеризовалась наивысшим содержанием аскорбиновой кислоты и сахаров [37]. Также культура богата витаминами E и P, макро- (K, Ca, Mg) и микроэлементами (Fe, Zn, Mn и др.) [38]. Изучение структурной когерентности последних как олигонутриентов, связанных с витаминами, целесообразно, поскольку они участвуют в регуляции иммунной системы растений, помимо влияния на органолептические свойства. Многие болезни людей и животных, которые ранее считались неизлечимыми, теперь можно лечить, уравновешивая баланс биогенных биоэлементов в живом организме.

Цель исследования – оценка изменения в микроэлементном профиле микрозелени горчицы, выращенной в искусственной среде под воздействием различных абиотических и биотических элиситоров.

Объекты и методы исследования

В качестве растительного объекта использовали сорт горчицы сарептской Ника. Семена перед посадкой стерилизовали 2,0 % раствором гипохлорита натрия и регидратировали в темноте при температуре 21 ± 1 °C. Проросшие семена высевали в лотки из пищевого пластика (18×14×3 см), заполненные почвогрунтом в виде кокосового волокна (табл. 1), и выращивали в течение трех повторных циклов по 15 дней в контролируемых условиях закрытого металлического гроубокса (80×50×80 см) до полного развития семядолей с парой настоящих листьев. На лоток уходило по 6 г семян.

Параметры внутренней рабочей зоны гроубокса: температура воздуха 23 ± 1 °C, относительная влажность 65 ± 5 %, концентрация углекислоты на уровне значений 800–1000 ppm (рис. 1). Сконструированный гроубокс состоит из (*1*) драйвера фитосветильника, (*2*) сенсорного блока управления с таймером, (*3*) вентилятора (кулера) для верхнего охлаждения фитосветильника, (*4*) оргстекла для установки блока питания и драйвера с прорезью под кулер, (*5*) фитосветильника с диммером, (6) бокового кулера для пассивного притока воздуха в рабочую зону, (*7*) защитного съемного оргстекла с ручками и (*8*) выдвижного отсека с ручкой для хранения.

Для создания полной светокультуры использовали линейный фитосветильник LEDforPlant (Россия) (54×50×2 см), который состоит из 8 запаралелленных в ряд светодиодных бустеров мощностью по 15 Вт каждый. Итоговая характеристика света от лампы

Таблица 1. Физико-химическая характеристика кокосового субстрата, используемого для выращивания микрозелени горчицы в контролируемой среде

Table 1. Physical and chemical profile of coconut substrate used for growing mustard microgreens in controlled environment

Физико-химические параметры	Значения
Плотность, кг/м^3	115,0
Водоудерживающая способность, %	64,0
Электропроводность, мСм/см	880,0
Кислотность, град	5,50
Степень минерализации волокна, ppm	400,0
Элементы, г/кг сухого вещества	
NO_3	2,65
NH_4	1,72
P	1,72
K	80,40
Ca	16,66
Mg	5,73
S	1,10
Na	19,81
Cl	77,50

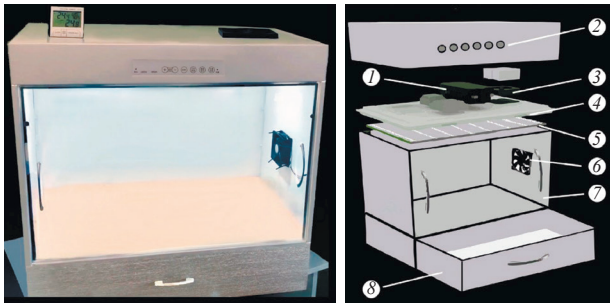


Рисунок 1. Внешний вид закрытого гроубокса, используемого в работе

Figure 1. Closed grow box for indoor cultivation of microgreens

на высоте подвеса 50 см была следующая: PPF (ФАР) – 440 мкмоль/м^2·с; световой поток – 31 800 Лм; эффективность – 2,4 PPF/Вт или 159,0 Лм/Вт; цветовая температура – 3000 К. Фотопериод составил 16 ч. Степень инсоляции, время суточного освещения и искусственный тип источника света были подобраны исходя из работ [39–45]. В данных работах лучшие результаты роста, антиоксидантной активности и содержания каротиноидов и токеферолов в микрозелени *Brassica* были достигнуты при облучении светодиодными лампами с интенсивностью 330 и 440 мкмоль/м^2·с. Что касается спектрального эффекта, то для сбалансированного урожая микрозелени с высоким содержанием фитонутриентов лучшей комбинацией светодиодов считается следующее процентное соотношение (RGB): красный – 75, зеленый – 7,5, синий – 17,5 % [46–48]. Однако эти данные требуют дальнейших исследований для выявления взаимодействий между другими типами спектров, характерных для роста сельскохозяйственных культур, и их связи с другими факторами окружающей среды [49].

Таблица 2. Биохимический профиль фульвокислот препарата Донум

Table 2. Biochemical profile of fulvic acids in Donum (Pharmorganic, Russia)

Органические кислоты, мг/л		Аминокислоты, мкг/л		Элементы, мг/кг	
Фумаровая	0	Метионин	0,60	Al	1,80
Уксусная	31,40	Валин	3,14	Ca	13,90
Щавеливая	0	Гистидин	0,50	K	4,50
Винная	0	Глицин	1,00	Mg	5,50
Лимонная	0	Глутаминовая кислота	4,82	Na	6,20
Янтарная	0,20	Серин	18,54	Sr	н/о
Галловая	0	Лейцин	0,52	Mn	0,40
Яблочная	0	Изолейцин	0,10	P	1,97
Адипиновая	0	Аспарагин	0,27	Si	0,50
		Аланин	1,00	B	4,70
		Триптофан	0,01	Ba	0,20
		Треонин	0,44	Cu	0,10
		Лизин	0,16	Ba	0,10
		Аргинин	10,00	Fe	7,80
		Тирозин	0	Co	0,07
		Пролин	0,10	Mo	0,01
		Цистеин	0,01	Ti	0,13
		Фенилаланин	0,01	Ni	н/о

н/о – не обнаружено.

н/о – not detected.

В качестве органической добавки в виде разбавленного концентрата фульвокислот (100 мг/л) при поливе под корень использовали коммерческий препарат Донум (ООО «Фарморганик», Россия). Композиционный состав элементного пула и низкомолекулярных органических соединений рабочей жидкости приведен в таблице 2. Биохимический анализ препарата проводили при помощи масс-спектрометрии высокого разрешения (ICP-MS) и жидкостной хроматографии (HPLC) с использованием приборов AT 7500 (Agilent Technologies, США) и ACQUITY (Waters, США) согласно методикам производителей.

Для инокуляции растений использовали эндомикоризный гриб *Glomus mosseae*, полученный из свежеприготовленной смеси стерилизованной дерно-подзолистой почвы и корней микоризированной суданской травы (*Sorghum* × *drummondii*). Норма внесения составила 50 г смеси на 300 г влажного субстрата в лотке. Покрытосеменные однолетники-эксплеренты из семейства *Brassicaceae* относят к немикотрофным культурам за счет их вторичных метаболитов, которые

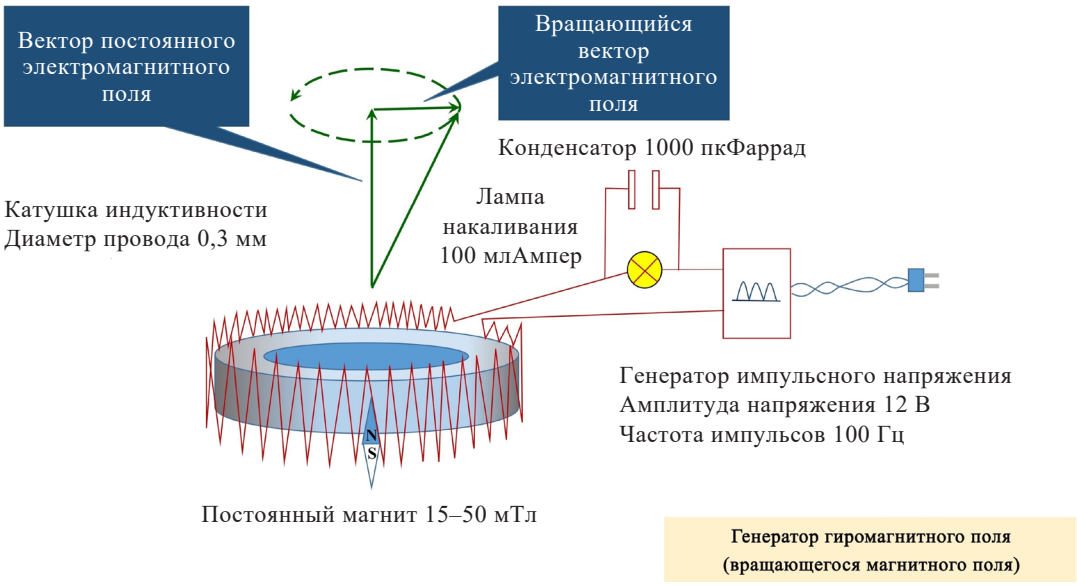


Рисунок 2. Фактор внешнего воздействия на микрозелень горчицы слабого электромагнитного излучения

Figure 2. External impact of weak electromagnetic radiation on mustard microgreens

подавляют развитие мицелия. Однако есть сведения о микоризообразовании у диких видов [50]. Данный штамм, наравне с *Gigaspora margarita*, *Scutellospora nigra* и *Glomus macrocarpum*, способен положительно влиять на растение-хозяина *Brassica juncea* L. путем улучшения его режима питания и набора биомассы [51].

Физическую обработку проводили путем ежесуточного нижнего облучения лотка с использованием устройства, действие которого основано на статическом воздействии слабого электромагнитного поля с преобладанием магнитной индукции (ФГБНУ ВНИИСХМ, Россия) (рис. 2).

Облучение проводилось каждый час в интервале с 8.00 часов утра до 24.00 часов вечера в течение 5 мин. Интенсивность облучения составила 20 мТл. На примере горчицы белой (*Sinapis alba* L.) показано, что использование магнитного поля напряженностью до 50 мТл давало лучшие результаты по улучшению всхожести семян и проростков [31]. Из российских источников литературы по теме изучения магнитобиологии можно привести монографию Ю. И. Новицкого [52]. Срок действия таких обработок мал, поэтому мы использовали систематическое облучение в течение всего фотопериода.

Общая схема эксперимента:

– К (контроль): растения горчицы выращивались без добавления в почву фульвокислот, инокуляции растений микоризой *Rhizophagus irregularis* и облучения растений низкочастотным электромагнитным полем;
– вариант Е1: растения горчицы выращивались с добавлением в почву фульвокислот, но без инокуляции растений микоризой *G. mosseae* и облучения растений низкочастотным электромагнитным полем;
– вариант Е2: растения горчицы выращивались при облучении растений низкочастотным электромагнитным полем, но без инокуляции растений микоризой *G. mosseae* и добавления в почву фульвокислот;
– вариант Е3: растения горчицы выращивались с микоризой *G. mosseae*, но без добавления в почву фульвокислот и облучения растений низкочастотным электромагнитным полем;
– вариант Е4: растения горчицы выращивались с добавлением в почву фульвокислот и при облучении растений низкочастотным электромагнитным полем, но без инокуляции растений микоризой *G. mosseae*;
– вариант Е5: растения горчицы выращивались с микоризой *G. mosseae* и при облучении растений низкочастотным электромагнитным полем, но без добавления в почву фульвокислот;
– вариант Е6: растения горчицы выращивались с микоризой *G. mosseae* и с добавлением в почву фульвокислот, но без облучения растений низкочастотным электромагнитным полем;
– вариант Е7: растения горчицы выращивались с микоризой *G. mosseae*, с добавлением в почву фульвокислот и при облучении растений низкочастотным электромагнитным полем.

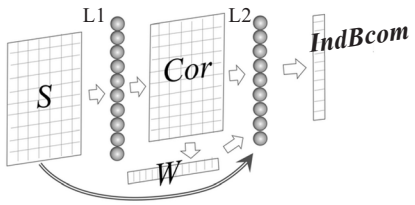
Полученную зеленую биомассу микрозелени срезали и быстро замораживали в камере MDF-C8V1 (Sanyo, Япония) с последующей сублимационной сушкой в леофильной установке 10ND (Scientz, Китай) под вакуумом. Полученный гидрофильный гомогенат измельчали до состояния порошка в фарфоровых ступках, взвешивали и проводили мокрое озоление с использованием концентрированной азотной кислоты в системе разложения проб Digiblock ED36S

(LabTech, Италия) в течение 4 ч при температуре 170 °C. Азотную кислоту предварительно очищали в системе очистки кислот subClean. Одновременно готовили холостой раствор с использованием тех же реактивов. Полученные после терморазложения суспензии сливали в мерные полиэтиленовые сосуды на 50 мл, доводили до метки 25 мл деионизированной водой и оставляли в течение суток для лучшего осаждения. На следующий день в верхнем отобранном супернатанте проводили элементный анализ методом атомно-эмиссионной спектромерии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ICPE-9000 (Shimadzu, Япония). По каждому элементу строили градуировочную характеристику, где коэффициент корреляции в каждом случае составил $R \geq 0{,}998$. Стандартной пробой являлся многоэлементный раствор для ICP (Sigma-Aldrich (Merck), США).

Результаты и их обсуждение

Для оценки уровня корреляционных соотношений микроэлементов в полученной биомассе мы вычислили индекс их биокомпозиции – *IndBcom* = 0–1. Данные индексы рассчитывали с помощью оригинальной авторской программы для ЭВМ (Свидетельство № 2023611435), созданной на основе программного кода прикладной системы Excel 2016. В программе заложен нейросетевой анализ повторяющегося ряда триплетных единиц (фрактального ряда чисел), соотносящихся друг с другом по логарифметическому закону. Это позволяет делать прогнозы локальной конформации нутриентного профиля в полученной биомассе растений (рис. 3).

Вычисления в данной сети выполняются слева направо. Вначале слой нейронов L1 вычисляет корреляционную матрицу *Cor*, которая заполняется значениями коэффициентов межвариантной корреляции микроэлементных профилей растений:



S – матрица микроэлементных профилей растений для 8 вариантов опыта; *Cor* – матрица межвариантной корреляции микроэлементных профилей растений; *W* – вектор весовых коэффициентов для нейронного слоя L2; *IndBcom* – вектор индексов биокомпозиции микроэлементных профилей растений; L1 и L2 – обозначения слоев нейронов, выполняющих матричные преобразования числовых данных

Рисунок 3. Корреляционная нейронная сеть, вычисляющая индексы биокомпозиции микроэлементных профилей растений горчицы

Figure 3. Correlation neural network used to calculate biocomposition indices of microelement profiles in mustard microgreens

$$Cor_{n,\,k} = CoefficientCorrelation\left(S_{n,\,\mathrm{K}}, S_{n,\,\mathrm{E1}}, \ldots S_{n,\,\mathrm{E8}};\; S_{k,\,\mathrm{K}}, S_{k,\,\mathrm{E1}}, \ldots, S_{k,\,\mathrm{E8}}\right) \quad (1)$$

где $S_{\mathrm{i.L}}$ и $S_{k.\mathrm{L}}$ – содержание в микроэлементном профиле растений микроэлемента с порядковым номером (i, k = 1, 2 … 9; табл. 3) в варианте опыта с порядковым номером (L = E1, E2 … E7); *CoefficientCorrelation* –

Таблица 3. Профили содержания микроэлементов в растениях микрозелени горчицы, мМоль/г растений, и ее биомасса по вариантам опыта

Table 3. Microelements in mustard microgreens, mmol/g vs. biomass in different samples

Микроэлементы		Варианты опыта							
		Контроль	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
n, k = 1	Fe	1,89	1,67	1,41	1,57	1,55	1,53	1,58	1,53
2	B	1,38	1,32	1,39	1,35	1,34	1,36	1,36	1,39
3	Zn	0,76	1,07	0,91	0,55	1,11	0,66	0,92	1,05
4	Mn	0,67	0,80	0,74	0,51	0,91	0,56	0,66	0,64
5	Al	1,37	0,59	0,36	0,60	0,60	0,53	0,65	0,54
6	Sr	0,16	0,19	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20
7	Cu	0,03	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02
8	Ba	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
9	Ni	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
P_{L}		–0,62	–0,52	–0,58	–0,70	–0,49	–0,67	–0,61	–0,61
$IndBcom_{\mathrm{L}}$ (± 0,010)*		0,22	0,26	0,24	0,20	0,27	0,21	0,23	0,23
Биомасса сухого порошка из растений (± 0,03), г		5,2	7,6	7,8	5,4	10,2	6,2	5,9	7,2

*Коэффициент корреляция индекса *IndBcom* с биомассой растений r = 0.83.

*Correlation coefficient of the *IndBcom* index with plant biomass r = 0.83.

функция, вычисляющая коэффициент корреляции между соответствующими массивами чисел.

Затем слой нейронов L2 вычисляет вектор весовых коэффициентов W, используя матрицу Cor:

$$W_k = \frac{1}{d} \times \left(\sum_n Cor_{n,k} - m \right) \quad (2)$$

где $$m = \frac{1}{9} \sum_n \sum_k Cor_{n,k} = 2{,}3;$$

$$d = \sqrt{\sum_k (\sum_n Cor_{n,k} - m)^2} = 5{,}51;$$

$n, k = 1, 2 \ldots 9$ – порядковые номера микроэлементов в микроэлементных профилях растений горчицы.

Затем вектор весовых коэффициентов W используется в матричных вычислениях для определения индексов биокомпозиции $IndBcomL$ микроэлементных профилей растений:

$$IndBcom_{\mathrm{L}} = [1 + \exp(2 \times P_{\mathrm{L}})]^{-1} \quad (3)$$

где $P = W \times S$ – вектор P, равный матричному произведению вектора весовых коэффициентов W на матрицу микроэлементных профилей S; P_{L} – значение вектора P, соответствующее варианту опыта L = К, Е1, Е2, …, Е7.

На основании результатов этих вычислений сделали заключение о том, что если значения $IndBcom$ стремятся к 0, то корреляционные связи в данных соотношениях микроэлементов отсутствуют или очень слабые, а при $IndBcon = 1$ эти связи достигают максимальных величин.

Результаты элементного анализа приведены в вид тепловой карты на рисунке 4. Среди всех вариантов (кроме Е3 и Е5) отмечено увеличение содержания цинка в среднем на 33,3 %. Больше всего его накапливалось в варианте Е4 (на 46,0 %) в сравнении с контролем. Однолетние растения из семейства крестоцветных являются гиперакумуляторами цинка [53]. Цинк необходим им для активации двух ключевых ферментов углеводного обмена: фруктозо-1,6-дифосфатазы и альдолазы. Цинк связан с синтезом нуклеиновых кислот и белков, фотосинтетической ассимиляцией CO_2 и метаболизмом фитогормонов – ауксинов [54, 55]. Таким образом, активацию роста и увеличение биомассы растений можно связать с повышением его аккумуляции в семядольных побегах. Подобный результат был отмечен ранее у виргинильних форм горчицы, когда у растений проявлялся аддитивный эффект увеличения биомассы при высоком содержании цинка в биомассе на фоне низкой концентрации бора [56]. В нашем случае содержание бора оставалось неизменным. У варианта Е4 отмечено увеличение концентрации Mn и Cu на 36,4 и 30,3 % соответственно. Кластерный анализ показал близость в распределении данного варианта с Е2. Во всех вариантах опыта при сторонней обработке растений уменьшились концентрации алюминия (на 59,5 %) и железа (18,0 %)

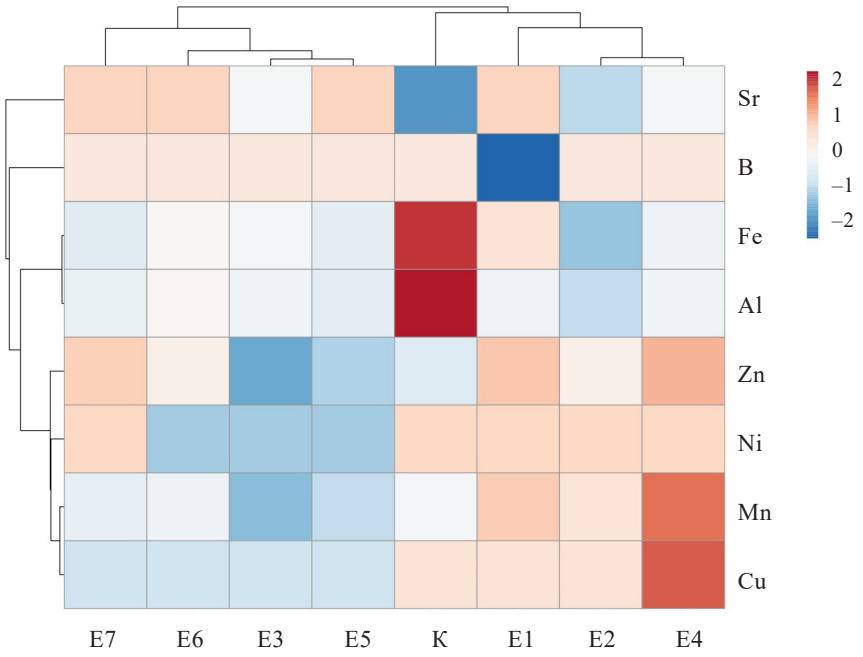


Рисунок 4. Профильное распределение биогенных микроэлементов в микрозелени горчицы по вариантам опыта (красный цвет – высокая концентрация каждого элемента, синий – низкая)

Figure 4. Profile distribution of biogenic microelements in mustard microgreens in different samples: red = high concentration; blue = low concentration

Таблица 4. Матрица межвариантной корреляции микроэлементных профилей растений горчицы по парам микроэлементов для вычисления весовых коэффициентов

Table 4. Intervariant correlation matrix of microelement profiles of mustard microgreens by microelement pairs: calculating weight coefficients

k / n		Fe	B	Zn	Mn	Al	Sr	Cu	Ba	Ni
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fe	1	1	–0,4500	–0,131	0	0,943	–0,395	0,296	0,366	0,699
B	2	–0,450	1	–0,022	–0,270	–0,202	–0,110	–0,351	–0,616	–0,018
Zn	3	–0,131	–0,0220	1	0,837	–0,219	0,352	0,603	0,581	0,234
Mn	4	0,000	–0,2700	0,837	1	–0,063	–0,021	0,910	0,842	0,417
Al	5	0,943	–0,2020	–0,219	–0,063	1	–0,543	0,274	0,237	0,760
Sr	6	–0,395	–0,1097	0,352	–0,021	–0,543	1	–0,342	–0,124	0,709
Cu	7	0,296	–0,3510	0,603	0,910	0,274	–0,342	1	0,922	0,659
Ba	8	0,366	–0,6157	0,581	0,842	0,237	–0,124	0,922	1	0,498
Ni	9	0,699	–0,0177	0,234	0,417	0,760	–0,709	0,659	0,498	1
W_k		0,005	–0,606	0,170	0,246	–0,020	–0,579	0,303	0,256	0,225

Для расчетов в нейронной сети все числовые единицы по микроэлементам были предварительно переведены из весовых значений в молярные величины (моляльные концентрации).

Рассчитанные индексы биокомпозиции $IndBcom_L$ микроэлементных профилей растений по вариантам опыта приведены в таблице 4. Также в таблице 4 приведен коэффициент корреляции индекса $IndBcom_L$ с биомассами растений горчицы. В варианте опыта Е4 достигнуто наибольшее значение индекса $IndBcom_{E4} = 0{,}27$. В этом же варианте опыта растения за срок вегетации формируют наибольшую питательную биомассу. Алгебраическая сумма разности значении в вариантах опыта Е2 и Е3 с контролем: $(IndBcom_{E1} - IndBcom_K) + (IndBcom_{E2} - IndBcom_K) = (0{,}263 - 0{,}225) + (0{,}237 - 0{,}225) = 0{,}050$ приблизительно равна разности значений индексов в вариантах опыта Е4 и К: $(IndBcom_{E4} - IndBcom_K) = (0{,}272 - 0{,}225) = 0{,}046$. На основании этого можно говорить о том, что два раздельных фактора (фульвокислоты и электромагнитное поле) позитивно влияют на растения горчицы независимо друг от друга. Варианты с использованием микоризы не оказали положительного действия на микрозелень на данном сроке вегетации.

Близость коэффициента корреляции индекса $IndBcom_L$ с биомассой растений горчицы к единице ($r = 0{,}83$) доказывает, что существует взаимосвязь между процессами в накоплении микроэлементов в растениях и скоростью их роста. Поэтому по возрастанию индекса *IndBcom* можно диагностировать улучшение условий развития растений, которые способствуют достижению их высокого качества и большей биомассы

Согласно статистическим расчетам все варианты не отличались от контроля ($p > 0{,}05$). Расчет вектора весовых коэффициентов *W* на основании межвариантной корреляционной взаимосвязи между профилями микроэлементов приведен в таблице 4.

Выводы

Рыночная стоимость микрозелени в 5–11 раз превышает затраты на ее производство. Поэтому данное производство является предприятием, способным поддерживать экономическую стабильность региона и накормить бедные слои населения. За счет разработки унифицированного технического регламента и совместного использования различных физических факторов и биоактивных добавок для ускорения сроков получения экологически чистой микрозелени можно будет решить глобальную проблему диверсификации продовольственного кризиса в мире и укрепления здоровья людей.

Примененный нами нейросетевой анализ соотношения микроэлементов в полученной микрозелени можно рассматривать как математическую модель для биохимической диагностики качества полученной биомассы и выбора лучших условий в биотехнологическом процессе возделывания растений в искусственной среде. На примере горчицы сарептской в структуре накопления микроэлементов лучший результат по расчетным индексам был диагностирован у варианта с совместной интродукцией в среду органо-минеральной композиции фульвокислот и облучением рассады низкочастотным электромагнитным полем. Именно в данном случае создавались благоприятные условия для ускоренного роста, развития растений и наполнения зелени микроэлементами.

Критерии авторства

Постановка исследования: Я. В. Пухальский и С. И. Лоскутов. Биоинформатика: Н. И. Воробьев и С. И. Лоскутов. Разработка методологии: Я. В. Пухальский, Н. И. Воробьев и А. В. Бабыка. Написание черновика рукописи: Я. В. Пухальский, Н. И. Воробьев и С. И. Лоскутов. Редактирование: М. А. Чукаева, Р. И. Глушаков, А. В. Бабыка и А. И. Якубовская. Визуализация: Я. В. Пухальский,

Н. И. Воробьев и Д. Д. Мещеряков. Администрирование проекта и анализ данных: М. А. Чукаева и Р. И. Глушаков.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

Ya.V. Pukhalsky and S.I. Loskutov designed the research. N.I. Vorobyov and S.I. Loskutov were responsible for the bioinformatics. Ya.V. Pukhalsky, N.I. Vorobyov, and A.V. Babyka developed the methodology. Ya.V. Pukhalsky, N.I. Vorobyov, and S.I. Loskutov drafted the manuscript. M.A. Chukaeva, R.I. Glushakov, A.V. Babyka, and A.I. Yakubovskaya proofread the manuscript. Ya.V. Pukhalsky, N.I. Vorobyov, and D.D. Meshcheriakov performed the infographics. M.A. Chukaeva and R.I. Glushakov supervised the project and analyzed the data.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interests regarding the publication of this article.

References

1. Treadwell D, Hochmuth R, Landrum L, Laughlin W. Microgreens: A new specialty crop. EDIS. 2020;5.

2. Turner ER, Luo Y, Buchanan RL. Microgreen nutrition, food safety, and shelf life: A review. Journal of Food Science. 2020;85(4):870–882. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15049

3. Verlinden S. Microgreens: Definitions, product types, and production practices. In: Warrington I, editor. Horticultural reviews. John Wiley & Sons; 2019. pp. 85–124. https://doi.org/10.1002/9781119625407.ch3

4. Kyriacou MC, Rouphael Y, Di Gioia F, Kyratzis A, Serio F, Renna M, *et al.* Micro-scale vegetable production and the rise of microgreens. Trends in Food Science and Technology. 2016;57:103–115. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.005

5. Dhakshayani GM, Priya SJA. A comparative study of phytochemical, antioxidant, anticarcinogenic, and antidiabetic potential of coriander (*Coriandrum sativum* L.): Microgreen and mature plant. Foods and Raw Materials. 2022;10(2):283–294. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-539

6. Mir SA, Shah MA, Mir MM. Microgreens: Production, shelf life, and bioactive components. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017;57(12):2730–2736. https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1144557

7. Abdallah MMF. Seed sprouts, a pharaoh's heritage to improve food quality. Arab Universities Journal of Agricultural Sciences. 2008;16(2):469–478.

8. Singh A, Banerjee P, Anas M, Singh N, Qamar I. Traditional nutritional and health practices targeting lifestyle behavioral changes in humans. Journal of Lifestyle Medicine. 2020;10:67–73. https://doi.org/10.15280/jlm.2020.10.2.67

9. VanWormer JJ, Boucher JL, Sidebottom AC, Sillah A, Knickelbine T. Lifestyle changes and prevention of metabolic syndrome in the Heart of New Ulm Project. Preventive Medicine Reports. 2017;6:242–245. https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2017.03.018

10. Buscemi S, Sprini D, Grosso G, Galvano F, Nicolucci A, Lucisano G, *et al.* Impact of lifestyle on metabolic syndrome in apparently healthy people. Eating and Weight Disorders – Studies on Anorexia, Bulimia and Obesity. 2014;19:225–232. https://doi.org/10.1007/s40519-014-0117-4

11. Xiao Z, Lester GE, Luo Y, Wang Q. Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products: Edible microgreens. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2012;60(31):7644–7651. https://doi.org/10.1021/jf300459b

12. Norman K, Haß U, Pirlich M. Malnutrition in older adults – Recent advances and remaining challenges. Nutrients. 2021;13(8). https://doi.org/10.3390/nu13082764

13. Ozawa H, Miyazawa T, Miyazawa T. Effects of dietary food components on cognitive functions in older adults. Nutrients. 2021;13(8). https://doi.org/10.3390/nu13082804

14. Hoang GM, Vu TT. Selection of suitable growing substrates and quality assessment of *Brassica* microgreens cultivated in greenhouse. Academia Journal of Biology. 2022;44(2):133–142. https://doi.org/10.15625/2615-9023/16833

15. Moraru PI, Rusu T, Mintas OS. Trial protocol for evaluating platforms for growing microgreens in hydroponic conditions. Foods. 2022;11(9). https://doi.org/10.3390/foods11091327

16. Mohanty A, Mahahlik G, Parida S. Nutritional analysis of few edible microgreens in variable growth medium using XRF technique. Asian Journal of Biological and Life Sciences. 2021;9(3):360–364. https://doi.org/10.5530/ajbls.2020.9.54

17. McGehee CS, Raudales RE, Elmer WH, McAvoy RJ. Efficacy of biofungicides against root rot and damping-off of microgreens caused by *Pythium* spp. Crop Protection. 2019;121:96–102. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.12.007

18. Xiao Z, Bauchan G, Nichols-Russell L, Luo Y, Wang Q, Nou X. Proliferation of Escherichia coli O157:H7 in soil-substitute and hydroponic microgreen production systems. Journal of Food Protection. 2015;78(10):1785–1790. https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-15-063

19. Ding H, Fu T-J, Smith MA. Microbial contamination in sprouts: How effective is seed disinfection treatment? Journal of Food Science. 2013;78(4):R495–R501. https://doi.org/10.1111/1750-3841.12064

20. Calvo P, Nelson L, Kloepper JW. Agricultural uses of plant biostimulants. Plant and Soil. 2014;383:3–41. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8

21. Yang R, Li Z, Huang M, Luo N, Wen J, Zeng G. Characteristics of fulvic acid during coprecipitation and adsorption to iron oxides-copper aqueous system. Journal of Molecular Liquids. 2019;274:664–672. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.11.030

22. Zanin L, Tomasi N, Cesco S, Varanini Z, Pinton R. Humic substances contribute to plant iron nutrition acting as chelators and biostimulants. Frontiers in Plant Science. 2019;10. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00675

23. Kamel SM, Afifi MMI, El-Shoraky FS, El-Sawy MM. Fulvic acid: A tool for controlling powdery and downy mildew in cucumber plants. International Journal of Phytopathology. 2014;3(2):101–104. https://doi.org/10.33687/phytopath.003.02.0866

24. Wu M, Song M, Liu M, Jiang C, Li Z. Fungicidal activities of soil humic/fulvic acids as related to their chemical structures in greenhouse vegetable fields with cultivation chronosequence. Scientific Reports. 2016;6. https://doi.org/10.1038/srep32858

25. Rouphael Y, Colla G. Synergistic biostimulatory action: Designing the next generation of plant biostimulants for sustainable agriculture. Frontiers in Plant Science. 2018;9. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01655

26. Bulgari R, Franzoni G, Ferrante A. Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. Agronomy. 2019;9(6). https://doi.org/10.3390/agronomy9060306

27. Andini S, Dekker P, Gruppen H, Araya-Cloutier C, Vincken J-P. Modulation of glucosinolate composition in brassicaceae seeds by germination and fungal elicitation. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2019;67(46):12770–12779. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b05771

28. Shalaby S, Horwitz BA. Plant phenolic compounds and oxidative stress: Integrated signals in fungal – plant interactions. Current Genetics. 2015;61:347–357. https://doi.org/10.1007/s00294-014-0458-6

29. Sangeetha N. Assessment of the effect of pulsating electromagnetic fields on biochemical and morphological parameters changes of *Brassica juncea* (*mustard seeds*). CIBTech Journal of Biotechnology. 2016;5(3):28–35.

30. Singh NN, Rai KK, Rai S. A short note on seed-borne magnetic effect on mustard, Brasszcajuncea L. crop. Electro- and Magnetobiology. 1998;17(1):99–102. https://doi.org/10.3109/15368379809012891

31. Feizi H, Salari A, Kaveh H, Firuzi Y. Investigation of static magnetic field durabilitytreatment on seed and seedling features of mustard (*Sinapis alba* L.). Journal of Medicinal and Spice Plants. 2020;24(2):75–79.

32. Setiyono S, Dwiharjo D, Arum AP. Application of magnetic field in NFT hydroponic systems to growth and production of mustard. Agrosains: Jurnal Penelitian Agronomi. 2022;24(1):6–11. https://doi.org/10.20961/agsjpa.v24i1.58217

33. Alrifai O, Hao X, Marcone MF, Tsao R. Current review of the modulatory effects of LED lights on photosynthesis of secondary metabolites and future perspectives of microgreen vegetables. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2019;67(22):6075–6090. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00819

34. Sharma S, Shree B, Sharma D, Kumar S, Kumar V, Sharma R, *et al.* Vegetable microgreens: The gleam of next generation super foods, their genetic enhancement, health benefits and processing approaches. Food Research International. 2022;155.

35. Sanlier N, Guler SM. The benefits of *Brassica* vegetables on human health. Journal of Human Health Research. 2018;1(1).

36. Abellán Á, Domínguez-Perles R, Moreno DA, García-Viguera C. Sorting out the value of cruciferous sprouts as sources of bioactive compounds for nutrition and health. Nutrients. 2019;11(2). https://doi.org/10.3390/nu11020429

37. Marchioni I, Martinelli M, Ascrizzi R, Gabbrielli C, Flamini G, Pistelli L, *et al.* Small functional foods: Comparative phytochemical and nutritional analyses of five microgreens of the Brassicaceae family. Foods. 2021;10(2). https://doi.org/10.3390/foods10020427

38. de la Fuente B, López-García G, Mañez V, Alegría A, Barberá R, Cilla A. Evaluation of the bioaccessibility of antioxidant bioactive compounds and minerals of four genotypes of Brassicaceae microgreens. Foods. 2019;8(7). https://doi.org/10.3390/foods8070250

39. Brazaitytė A, Miliauskienė J, Vaštakaitė-Kairienė V, Sutulienė R, Laužikė K, Duchovskis P, *et al.* Effect of different ratios of blue and red LED light on Brassicaceae microgreens under a controlled environment. Plants. 2021;10(4). https://doi.org/10.3390/plants10040801

40. Brazaitytė A, Sakalauskienė S, Samuolienė G, Jankauskienė J, Viršilė A, Novičkovas A, *et al.* The effects of LED illumination spectra and intensity on carotenoid content in Brassicaceae microgreens. Food Chemistry. 2015;173:600–606. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.077

41. Craver JK, Gerovac JR, Lopez RG, Kopsell DA. Light intensity and light quality from sole-source light-emitting diodes impact phytochemical concentrations within *Brassica* microgreens. Journal of the American Society for Horticultural Science. 2017;142(1):3–12. https://doi.org/10.21273/JASHS03830-16

42. Gerovac JR, Craver JK, Boldt JK, Lopez RG. Light intensity and quality from sole-source light-emitting diodes impact growth, morphology, and nutrient content of *Brassica* microgreens. HortScience. 2016;51(5):497–503. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.5.497

43. Kopsell DA, Pantanizopoulos NI, Sams CE, Kopsell DE. Shoot tissue pigment levels increase in "Florida Broadleaf" mustard (*Brassica juncea* L.) microgreens following high light treatment. Scientia Horticulturae. 2012;140:96–99. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.04.004

44. Samuolienė G, Brazaityte A, Jankauskiene J, Viršile A, Sirtautas R, Novičkovas A, *et al.* LED irradiance level affects growth and nutritional quality of *Brassica* microgreens. Central European Journal of Biology. 2013;8(12):1241–1249. https://doi.org/10.2478/s11535-013-0246-1

45. Samuolienė G, Brazaitytė A, Viršilė A, Miliauskienė J, Vaštakaitė-Kairienė V, Duchovskis P. Nutrient levels in *Brassicaceae* microgreens increase under tailored light-emitting diode spectra. Frontiers in Plant Science. 2019;10. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01475

46. Kamal KY, Khodaeiaminjan M, El-Tantawy AA, Moneim DA, Salam AA, Ash-shormillesy SMA, *et al.* Evaluation of growth and nutritional value of *Brassica* microgreens grown under red, blue and green LEDs combinations. Physiologia Plantarum. 2020;169(4):625–638. https://doi.org/10.1111/ppl.13083

47. Jones-Baumgardt C, Llewellyn D, Ying Q, Zheng Y. Intensity of sole-source light-emitting diodes affects growth, yield, and quality of Brassicaceae microgreens. HortScience. 2019;54(7):1168–1174. https://doi.org/10.21273/HORTSCI13788-18

48. Ying Q, Kong Y, Jones-Baumgardt C, Zheng Y. Responses of yield and appearance quality of four *Brassicaceae* microgreens to varied blue light proportion in red and blue light-emitting diodes lighting. Scientia Horticulturae. 2020;259. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108857

49. Paradiso R, Proietti S. Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: the state of the art and the opportunities of modern LED systems. Journal of Plant Growth Regulation. 2021;41:742–780. https://doi.org/10.1007/s00344-021-10337-y

50. Vierheilig H, Bennett R, Kiddle G, Kaldorf M, Ludwig-Müller J. Differences in glucosinolate patterns and arbuscular mycorrhizal status of glucosinolate-containing species. New Phytologist. 2020;146(2):343–352. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00642.x

51. Puttaradder J, Lakshman HC. Screening of efficient AM fungus for *Brassica juncea* (L.) Czern & Coss to improve biomass yield and seeds number. International Journal of Pure and Applied Bioscience. 2015;3(3):147–152.

52. Novitsky YuI, Novitskaya GV. Effect of static magnetic field on plants. Moscow: Nauka; 2016. 350 p. (In Russ.). [Новицкий Ю. И., Новицкая Г. В. Действие постоянного магнитного поля на растения. М.: Наука, 2016. 350 с.].

53. Peer WA, Mahmoudian M, Freeman JL, Lahner B, Richards EL, Reeves RD, *et al.* Assessment of plants from the Brassicaceae family as genetic models for the study of nickel and zinc hyperaccumulation. New Phytologist. 2006;172(2):248–260. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01820.x

54. Tsonev T, Lidon FJC. Zinc in plants – An overview. Emirates Journal of Food and Agriculture. 2012;24(4):322–333.

55. Broadley MR, White PJ, Hammond JP, Zelko I, Lux A. Zinc in plants. New Phytologist. 2007;173(4):677–702. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x

56. Sinha P, Jain R, Chatterjee C. Interactive effect of boron and zinc on growth and metabolism of mustard. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2000;31(1–2):41–49. https://doi.org/10.1080/00103620009370419