

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

УДК 574

**АНТИОКСИДАНТНАЯ АКТИВНОСТЬ МИКРОЗЕЛЕНИ,
ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ****Бурак Л.Ч., Карбанович В.И.***ООО «Белросаква», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com, info@belrosakva.by*

В последние годы микрозелень, или молодая зелень овощей, собранная на стадии рассады, привлекает особое внимание благодаря пищевой ценности и потенциальной пользе для здоровья. Цель статьи – обзор результатов научных исследований оценки и биодоступности антиоксидантной активности микрозелени, а также состояние и перспективы использования. В качестве материалов исследования послужили научные статьи, опубликованные в период с 2015 по 2023 г. Научный поиск провели в научных базах данных ScienceDirect, Scopus и Web of Science. Поиск проводился с применением дескрипторов «микрозелень», «антиоксидантная активность», «выращивание микрозелени», «пищевая ценность», «биодоступность». Среди статей, соответствующих критериям включения, для составления данного обзора было выбрано 88 исследований. Результаты исследований показали, что микрозелень содержит многие биологически активные вещества, оказывающие влияние на антиоксидантную активность. Это глюкозинолаты, каротиноиды и фенольные соединения, витамины (С, Е и К), клетчатка и жирные кислоты омега-3, а также многие микро- и макроэлементы (железо и магний) и другие питательные вещества. Антиоксидантные соединения играют ключевую роль в борьбе с окислительным стрессом и имеют ряд преимуществ для здоровья: от здоровья сердечно-сосудистой системы до контроля диабета и потенциальной противораковой эффективности. Вместе с тем качественный и количественный состав многих антиоксидантных веществ, установленных в микрозелени, зависит от вида растения, условия выращивания и времени сбора урожая. Микрозелень является перспективным продуктом функционального и профилактического назначения. Дальнейшие научные исследования должны быть сосредоточены на оптимизации методов выращивания, изучении поглощения антиоксидантов и их потенциального применения в функциональных продуктах питания и нутрицевтиках. Данный обзор может быть использован в качестве материала для дальнейших исследований микрозелени и ее антиоксидантной активности.

Ключевые слова: микрозелень, овощи, стадия роста, сбор урожая, пищевая ценность, антиоксиданты, витамины, фенольные соединения, биостимуляторы

**ANTIOXIDANT ACTIVITY OF MICROGREENS,
POTENTIAL OF USE. REVIEW OF THE SUBJECT FIELD****Burak L.Ch., Karbanovich V.I.***LLC Belrosakva, Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com, info@belrosakva.by*

In recent years, microgreens, or young vegetable greens harvested at the seedling stage, have received particular attention due to their nutritional value and potential health benefits. The purpose of the article is to review the results of scientific research on the assessment and bioavailability of the antioxidant activity of microgreens, as well as the status and prospects for use. The research materials were scientific articles published between 2015 and 2023. The scientific search was carried out in the scientific databases ScienceDirect, Scopus and Web of Science. The search was conducted using the descriptors “microgreens”, “antioxidant activity”, “microgreens cultivation”, “nutritional value”, bioavailability.” Among the articles that met the inclusion criteria, 88 studies were selected for this review. Research results have shown that microgreens contain many biologically active substances that affect antioxidant activity. These are glucosinolates, carotenoids and phenolic compounds, vitamins (C, E and K), fiber and omega-3 fatty acids, as well as many micro and macroelements (iron and magnesium) and other nutrients (fiber and omega-3 fatty acids). Antioxidant compounds play a key role in combating oxidative stress and have a range of health benefits, from cardiovascular health to diabetes control and potential anti-cancer effectiveness. At the same time, the qualitative and quantitative composition of many antioxidant substances found in microgreens depends on the type of plant, growing conditions and harvest time. Microgreens are a promising product for functional and preventive purposes. Further scientific research should focus on optimizing growing methods, studying the absorption of antioxidants and their potential use in functional foods and nutraceuticals. This review can be used as material for further research on microgreens and their antioxidant activity.

Keywords: microgreens, vegetables, growth stage, harvesting, nutritional value, antioxidants, vitamins, phenolic compounds, biostimulants

Микрозелень, собранная на стадии рассады, в последние годы привлекает большое внимание, так как помимо особого вкуса микрозелень повышает визуальную привлекательность различных кулинарных блюд благодаря своим ярким оттенкам. Помимо вкуса и внешнего вида современный потребитель отдает предпочтение пищевым про-

дуктам с высокой пищевой ценностью и обладающим антиоксидантной активностью [1–3]. Растения, в том числе микрозелень, производят широкий спектр фитохимических веществ, в том числе антиоксидантов, для борьбы с факторами стресса окружающей среды [4; 5]. Хотя антиоксиданты содержатся в различных частях растений,

таких как листья, стебли и семена, микрозелень отличается высокой пищевой ценностью [6]. Исследования показали, что такие сорта, как краснокочанная капуста, кинза, зеленая редька дайкон, содержат повышенные концентрации необходимых питательных веществ и биологически активных соединений, включая аскорбиновую кислоту, каротиноиды, филлохинон и токоферолы [7; 8], а также макро- и микроэлементов, таких как калий, кальций, железо, марганец, цинк, селен и молибден. При определенных условиях эти концентрации могут быть до 40 раз выше, чем у полностью зрелых растений, при этом содержание нитратов намного ниже по сравнению со зрелыми салатами [9]. Хотя конкретный качественный и количественный состав антиоксидантов варьируется в зависимости от сорта микрозелени, результаты исследований показывают, что обычные виды микрозелени, такие как чечевица, брокколи, китайская капуста, фиолетовая редька и красная капуста, имеют высокую антиоксидантную активность, в первую очередь связанную с их повышенным уровнем аскорбиновой кислоты [10–12]. Следует отметить, что выращивание микрозелени имеет ряд преимуществ, так как она требует мало места и ресурсов, ее выращивают круглый год в контролируемых условиях, что делает ее легкодоступным и устойчивым источником антиоксидантов. Кроме того, ее выращивание помогает продвигать безопасные и устойчивые методы ведения сельского хозяйства [13]. Микрозелень можно собирать часто из-за ее короткого цикла роста, составляющего от 7 до 21 дня, так что является устойчивым источником свежей пищи с высокой пищевой ценностью [3]. Преимущество микрозелени, в отличие, например, от листовых овощей, которые состоят только из листьев и обязательно срезаются перед продажей, состоит в том, что ее можно продавать неповрежденной, со всем субстратом на котором она произрастает. Это позволяет потребителю срезать продукт всего за несколько минут до употребления. Данный инновационный маркетинговый ход гарантирует более длительный срок годности продукта и обеспечивает высокое качество как с точки зрения свежести, так и с точки зрения питательной ценности [14]. Целью данного обзора является анализ результатов научных исследований, касающихся содержания антиоксидантов в микрозелени и их преимуществ для здоровья, состояние и перспективы использования. Данный обзор включает в себя исследования по изучению содержания антиоксидантов в микрозелени, таких как каротиноиды, флавоноиды и фенольные

кислоты, с учетом исследований как *in vitro*, так и *in vivo*, а также анализ факторов, влияющих на концентрацию антиоксидантов в микрозелени, таких как методы выращивания и сроки сбора урожая.

Материалы и методы исследования

Материалами исследования послужили научные статьи, опубликованные в период с 2015 по 2023 г. Научный поиск провели в научных базах данных ScienceDirect, Scopus и Web of Science. Поиск проводился с применением дескрипторов «микрозелень», «антиоксидантная активность», «выращивание микрозелени», «пищевая ценность», «биодоступность». Среди статей, соответствующих критериям включения, для составления данного обзора было выбрано 88 исследований.

Результаты исследования и их обсуждение

Определение и характеристики микрозелени

Микрозелень – это молодая рассада овощей, которую обычно собирают либо после завершения развития семядолей, либо когда вместе со стеблем появляются первые настоящие листья [15; 16]. Микрозелень имеет короткий цикл роста, который обычно длится 7–21 день, с оптимальным временем сбора урожая примерно на 14-й день, когда она достигает высоты 3–10 см. Различия в росте и размере можно объяснить разнообразием микрозелени [3]. За этот короткий период она приобретает концентрированный вкус и впечатляющий набор питательных веществ [16; 17]. Ростки, в отличие от микрозелени, представляют собой проросшие семена, которые едят целиком, включая семя, корень и побег. Ростки обычно выращивают в воде или во влажной среде и собирают вскоре после появления корня. Биологически росток представляет собой первую стадию развития растения, возникающую в процессе прорастания семян [15]. Люцерна, маш и ростки брокколи – это несколько разновидностей ростков. Ростки часто используются в салатах, сэндвичах и жарком из-за их нежного вкуса и хрустящей текстуры. И ростки, и микрозелень богаты питательными веществами, но их профиль питательных веществ различен. Основными компонентами ростков являются углеводы, белки и ферменты, такие как амилаза, липаза и протеазы [18].

С другой стороны, молодая зелень – это молодые растения, собранные после развития первых настоящих листьев, но до полной зрелости [19]. Обычно период сбора молодой зелени составляет от 20 до 40 дней

(от 10 до 15 см) [3], в зависимости от таких факторов, как сортовые характеристики, сезон выращивания, факторы окружающей среды и требования рынка. Молодую зелень, такую как редис, салат, руккола, мангольд, щавель и укроп, обычно выращивают в почве, где хорошо сбалансированная смесь органических веществ и минералов обеспечивает необходимые питательные вещества, например сочетание зеленого компоста и горшечной почвы [20]. При гидропонике молодая зелень демонстрирует устойчивый рост в богатой питательными веществами водной среде, которая может включать такие вещества, как жидкий дигестат, что позволяет точно контролировать потребление питательных веществ и условия роста [21]. Молодую зелень целесообразно использовать в салатах, коктейлях и в качестве декоративных элементов из-за ее нежной текстуры и нежного вкуса. Помимо вкуса, эта зелень содержит широкий спектр необходимых витаминов, минералов и пищевых волокон, повышающих ее общую пищевую ценность [22]. Хотя и микрозелень, и ростки, и молодая зелень считаются молодыми растениями, они различаются по выращиванию, времени сбора, вкусу, текстуре и содержанию питательных веществ. Микрозелень выделяется своим ярким цветом, насыщенным вкусом и высокой питательной ценностью.

Понимание стадий роста и оптимального времени сбора микрозелени имеет решающее значение для оптимизации ее вкуса и пищевой ценности. Микрозелень собирают как молодые растения, когда их семядоли полностью развились и вместе со стеблем появились один или два настоящих листа. Большинство сортов микрозелени имеют среднюю высоту от 2,5 до 7,6 см [23]. Как и у других семенных растений, процесс роста микрозелени начинается со стадии прорастания. На этом этапе семена впитывают воду и начинают прорастать. Всхожесть семян микрозелени сильно зависит от множества факторов, включая субстрат, влажность, температуру и световой режим. Чтобы инициировать прорастание, семена микрозелени обычно выдерживают в темноте при температуре 20–24 °C и относительной влажности 100%, в зависимости от вида. Например, семена базилика прорастали в камере с контролируемым климатом в течение трех дней при постоянной температуре 24 °C и в темноте. После этой начальной фазы микрозелень выставляют на свет и ежедневно поливают до тех пор, пока не появятся первые настоящие листья [24–26]. Микрозелень достигает стадии семядолей после прорастания, при этом семя-

доли представляют собой первую пару эмбриональных листьев, появляющихся из семени [27]. На этом этапе растение получает питание из накопленной энергии семян. Семядоли обычно толстые и мясистые и служат исходным источником питательных веществ для прорастания семян и развития растений [28]. Стадия семядолей обычно длится 3–5 дней, в зависимости от конкретного сорта микрозелени [17]. После завершения стадии семядолей микрозелень переходит в стадию настоящего листа. Настоящие листья – это второй развивающийся набор листьев, демонстрирующий характеристики зрелых листьев растения. На этом этапе начинают проявляться вкус, текстура и цвет микрозелени. Обычно стадия настоящего листа длится от 7 до 14 дней, в зависимости от сорта и желаемого уровня зрелости. Полное развитие настоящих листьев микрозелени обычно происходит в течение 8–10 дней [29]. Определение оптимального времени сбора урожая имеет решающее значение для того, чтобы микрозелень достигла максимального вкуса и содержания питательных веществ. Идеальное время для сбора микрозелени – время, когда она полностью развила первые настоящие листья, но еще не достигла полной зрелости. Слишком долгое ожидание сбора урожая может привести к тому, что листья станут более жесткими и вкус ухудшится. Время сбора микрозелени варьируется в зависимости от конкретного сорта и цели использования.

Распространенные виды микрозелени и их пищевая ценность

Микрозелень представляет собой разнообразный спектр вкусов, текстур и питательных веществ из-за различного генеалогического происхождения, охватывающего разные семейства растений. Например, семейство *Alliaceae*, включающее зеленый лук, лук-шалот, лук и чеснок содержит особый набор соединений серы, а в семействе *Amaranthaceae*, включающем шпинат, амарант, свеклу, мангольд, лебеду и пурпурную селезень, преобладает обилие питательных элементов, таких как нитраты и беталаины [30; 31]. Члены семейства *Apiaceae*, такие как сельдерей, кинза, кервель, фенхель, петрушка, морковь и укроп, дают разнообразный набор ароматических соединений, таких как терпены и фенилпропаноиды [32]. Семейство *Asteraceae* представляет салат, эндивий, подсолнечник, хризантему-гирлянду, шунгику и бархатцы, каждый из которых облагораживает состав микрозелени своим особым набором фитохимических веществ, таких как сесквитерпеновые лак-

тоны и терпены [33]. Наконец, семейство *Brassicaceae*, в которое входят горчица, капуста, брокколи, редис и китайская капуста, содержит глюкозинолаты и другие глюкозиды, усиливающие уникальные свойства микрозелени [34].

Капуста кудрявая (*Brassica oleracea var. sabellica*) и редис (*Raphanus sativus*) – популярные виды микрозелени, каждая из которых имеет свои особые характеристики и пищевой профиль. Слегка горьковатый вкус и хрустящая текстура капусты делают ее отличным дополнением к салатам, бутербродам и смузи. Установлена значительная корреляция между его горечью и уровнем специфических глюкозинолатов, а именно глюконапина и глюкобрассицина [5; 35]. Капуста содержит витамины А, С, Е и К, а также фенольные и каротиноидные соединения, которые, как было доказано, обладают антиоксидантной и противовоспалительной активностью [35], а микрозелень редиса характеризуется пряным вкусом и ярким красным цветом. Они служат отличным источником витамина С, фолиевой кислоты и калия, а также содержат глюкозинолаты с противораковыми свойствами [36].

Руккола (*Eruca sativa*) имеет острый вкус и нежную текстуру. Помимо содержания глюкозинолатов и фенольных соединений, она содержит витамины А, С и К, а также кальций, железо и магний [37]. Руккола также содержит нитраты, которые могут улучшить физическую работоспособность за счет увеличения кровотока и снижения потребления кислорода [38].

Брокколи (*Brassica oleracea var. italica*) – еще один популярный вид, известный своим мягким, слегка сладким вкусом и хрустящей текстурой. Это хороший источник витаминов С, А и К, а также сульфорафана – мощного антиоксидантного, противовоспалительного и противоракового соединения [39]. Сульфорафан (SFN) – высокоэффективное противораковое соединение, которое естественным образом содержится в брокколи. Термическая обработка при температуре 60–70 °С в течение 5–10 мин существенно увеличивает продукцию SFN, приводя к семикратному увеличению. Образование SFN происходит из соединения-предшественника, называемого глюкорафанином (GPN), и его преобразование происходит во время разрезания или жевания брокколи, чему способствует эндогенный фермент мирозиназа. GPN более стабилен, чем SFN, а концентрация GPN выше в ростках брокколи, чем в зрелых целых кочанах [39].

Базилик сладкий (*Ocimum basilicum*), известный своим ароматом и сладким вкусом [40], широко используется в итальянской

кухне. Он содержит витамины (К, С, Е и А), а также минералы, такие как железо, калий, магний и натрий. Кроме того, он обладает антиоксидантными, противораковыми, противомикробными, противогрибковыми и противовоспалительными соединениями [41–43].

Побеги гороха (*Pisum sativum*) имеют сладкий, свежий вкус и нежную текстуру. Они богаты витаминами А, С и К, а также такими минералами, как железо, кальций и калий.

Микрозелень подсолнечника (*Helianthus annuus*) имеет содержание белка 24–30% и содержит все восемь незаменимых аминокислот. По сравнению с сухими семенами подсолнечника в микрозелени подсолнечника содержание витаминов намного больше за счет ферментативной активности при прорастании. Прорастивание повышает уровень лизина, триптофана и свободных аминокислот в микрозелени подсолнечника. Эта микрозелень также содержит высокий уровень клетчатки, общих фенольных соединений (таких как кофейная и протокатеховая кислоты), обладает высокой антиоксидантной активностью, незаменимыми жирными кислотами и витаминами А, В, С, D и Е. Кроме того, она содержит важные макроэлементы, такие как кальций, фосфор, железо, йод, калий, магний, цинк, марганец, медь и хром [44].

По сравнению со зрелыми растениями микрозелень горчицы (*Brassica nigra*) содержит повышенные уровни специфических фитохимических веществ, таких как β-каротин, ликопин, фенольные кислоты и флавоноиды. Эти соединения усиливают антиоксидантную активность [1].

Зеленый лук, известный с научной точки зрения как *Allium fistulosum*, из семейства *Alliaceae*, обладает необходимыми макроэлементами, такими как натрий, калий, магний и кальций, а также витаминами С, В6, D, К, В9 и В12. Также лук содержит биологически активные соединения, в том числе кверцетин, сероорганические соединения и глутатион, что способствует потенциальной пользе для здоровья, эффективен против ожирения и применяется при лечении различных состояний [45; 46].

Лук-шалот, принадлежащий к семейству *Alliaceae*, как *Allium cepa var. aggregatum*, обладает питательным профилем, включающим витамины С, В1, В6, А, Е, К и В9, а также необходимые минералы, такие как кальций, железо, магний, калий и селен. Лук-шалот также содержит биологически активные соединения, в том числе витамин С, метиин, аллицин, изоаллиин, пропин и жирорастворимые серные соединения, которые оказы-

вают противораковое, противодиабетическое, антиоксидантное, антиагрегантное, антигипертензивное, антидепрессивное, нейропротекторное, противовоспалительное и противопаразитарное свойства [47].

Чеснок (*Allium sativum*) известен своей пищевой ценностью, включая витамины С, В6, В1, В2, В3 и В9, а также минералы, такие как кальций, железо, магний, фосфор, калий, цинк, марганец и селен. Чеснок также содержит соединения серы, витамин С и фенольные соединения, что способствует его разнообразным преимуществам для здоровья, таким как антибактериальные, противогрибковые, противопаразитарные, антихолестериновые, противодиабетические, защитные свойства печени, противораковые и иммуностимулирующие свойства [48].

Антиоксидантная активность микрорзелени

Антиоксиданты характеризуются своей способностью отдавать электрон свободным радикалам, которые представляют собой высокореактивные молекулы, способные вызывать повреждения клеток. Нейтрализуя свободные радикалы, антиоксиданты эффективно уменьшают их вредное воздействие на клеточные структуры. Основным механизмом, с помощью которого антиоксиданты оказывают свое защитное действие, является способность улавливать и устранять свободные радикалы, тем самым задерживая или ингибируя клеточное повреждение. Антиоксиданты можно разделить на три группы в зависимости от механизма их действия. Первая группа состоит из первичных антиоксидантов, которые в первую очередь действуют как поглотители свободных радикалов. Эти антиоксиданты напрямую взаимодействуют со свободными радикалами, нейтрализуя их и предотвращая дальнейшее повреждение [49]. Ко второй группе относятся вторичные антиоксиданты, которые играют решающую роль в предотвращении цепных окислительных реакций, ингибируя иницирование таких реакций. Они действуют как профилактические антиоксиданты, препятствуя образованию свободных радикалов и их последующему распространению. Наконец, третичные антиоксиданты относятся к группе, которая участвует в восстановлении поврежденных биомолекул. Эти антиоксиданты восстанавливают и реабилитируют биомолекулы, пострадавшие от окислительного стресса, смягчая пагубные последствия окислительного повреждения [50]. Поддерживая баланс между свободными радикалами и антиоксидантами, известный как система антиоксидантной

защиты, организм может противодействовать вредному воздействию окислительного стресса [51]. Организм человека обладает способностью вырабатывать различные эндогенные метаболические антиоксиданты посредством внутренних метаболических процессов. Эти эндогенные антиоксиданты состоят из липоевой кислоты, глутатиона, L-аргинина, коэнзима Q10, мелатонина, мочевой кислоты, билирубина, металлов-хелатирующих белков, трансферрина и ряда других веществ. Их основной функцией является защита клеток и тканей от окислительного повреждения путем противодействия вредному воздействию свободных радикалов и активных форм кислорода. Благодаря своим антиоксидантным свойствам эти эндогенные метаболические антиоксиданты играют решающую роль в поддержании клеточного гомеостаза и сохранении общего состояния здоровья [52]. Экзогенные антиоксиданты, такие как токоферолы, каротиноиды, аскорбиновая кислота, флавоноиды и фенольные соединения, играют двойную роль в смягчении окислительного стресса и воспаления, которые являются критическими факторами в развитии и прогрессировании хронических заболеваний. Конкретные классы этих антиоксидантов, включая антоцианы, флавонолы, изофлавоны, стильбены, кверцетин, катехины, ресвератрол, кумаровую кислоту, β-каротин и ликопин, были тщательно исследованы на предмет их противовоспалительного действия. Эти соединения не только нейтрализуют свободные радикалы, но и модулируют сигнальные пути, связанные с окислительным стрессом и воспалением [53–55]. Микрорзелень содержит широкий спектр антиоксидантов, которые играют важную роль в поддержании общего состояния здоровья. Среди различных типов антиоксидантов, обнаруженных в микрорзелени, решающую роль играют каротиноиды. Эти пигменты, в том числе бета-каротин, ликопин и лютеин/зеаксантин, не только придают микрорзелени яркий цвет, но также обладают мощными антиоксидантными свойствами [56–58]. Нейтрализуя свободные радикалы и снижая окислительный стресс, каротиноиды в микрорзелени также способствуют снижению риска хронических заболеваний, таких как болезни сердца и некоторые виды рака [3; 36].

Фенольные соединения – еще одна группа антиоксидантов, присутствующих в микрорзелени [3]. Представителями фенольных соединений являются флавоноиды, антоцианы и фенольные кислоты, известные своими антиоксидантными и противовоспалительными свойствами [59]. Микрорзелень

также является источником витаминов, особенно витаминов С и Е. Витамин С действует как водорастворимый антиоксидант, укрепляя иммунную систему, способствуя синтезу коллагена и защищая клетки от окислительного повреждения. С другой стороны, витамин Е, жирорастворимый антиоксидант, защищает клеточные мембраны и липиды от окислительного стресса [60]. Включение микрозелени в рацион может способствовать соблюдению рекомендуемой суточной дозы необходимых витаминов, кроме того, микрозелень содержит микроэлементы, такие как селен и цинк, которые действуют как важные кофакторы антиоксидантной активности ферментов [1].

Факторы, влияющие на содержание антиоксидантов в микрозелени

На содержание антиоксидантов в микрозелени влияют несколько факторов, включая сорт или разновидность микрозелени, условия выращивания и методы обработки после сбора урожая. Выбор сорта важен, поскольку разные сорта микрозелени могут иметь значительные различия в уровне антиоксидантов. Некоторые сорта могут быть специально выведены или отобраны из-за более высоких концентраций каротиноидов, фенольных соединений или витаминов, повышающих их антиоксидантный потенциал [8; 22]. Факторы окружающей среды играют решающую роль в синтезе и накоплении антиоксидантов в микрозелени. Обеспечение оптимальных условий выращивания, включая соответствующий свет, температуру, влажность и обеспечение питательными веществами, может повысить выработку антиоксидантов [61]. Оптимальная температура и время сбора для получения максимального урожая, определенные для шести микрозеленных культур, находились в диапазоне от 24 до 28 °С и от 6-го до 13-го дня соответственно [29]. Исследование влияния засоления на экстракты микрозелени пшеницы показало, что различные концентрации хлорида натрия (NaCl) влияют на биохимический профиль микрозелени. В частности, концентрация 12,5 мМ NaCl приводила к повышению уровня β-каротина, фенольной кислоты, флавоноидов и аскорбиновой кислоты, а также к увеличению активности по улавливанию нитритов. С другой стороны, концентрация NaCl 25 мМ приводила к максимальному содержанию антоцианов и активности по улавливанию радикалов. Эти результаты показывают, что контролируемый стресс от засоления может служить эффективной стратегией для разработки инновационных продуктов из экстракта микрозелени пшеницы, обо-

гащенных питательными компонентами [29]. Непрерывное освещение оказалось полезным при выращивании микрозелени, поскольку оно увеличивает выход свежей биомассы и снижает расходы на электроэнергию. Примечательно, что зелень капусты и амаранта обладает повышенными антиоксидантными свойствами, а также повышенным уровнем фенолов и антоцианов при воздействии как дневного света, так и постоянного освещения. Аналогичным образом зеленый базилик и фиолетовый базилик сохраняют концентрацию вторичных метаболитов, одновременно снижая затраты на электроэнергию за счет непрерывного освещения, что делает его устойчивой и экономически жизнеспособной технологией освещения для производства микрозелени [63]. Исследование показало, что, хотя воздействие УФ-В света уменьшает физические размеры и общую биомассу микрозелени, оно значительно усиливает их антиоксидантные свойства и такие важные фитохимические вещества, как флавоноиды и фенольные соединения. Воздействие облучения УФ-В также привело к снижению содержания некоторых фотосинтетических пигментов в ростках, но к увеличению концентрации хлорофилла В в микрозелени. Результаты указывают на потенциальную возможность регулируемого воздействия УФ-В повышать как пищевую ценность, так и полезные для здоровья свойства этих растений, делая их полноценными функциональными продуктами питания [64]. Другое исследование показало, что 100% синий свет способствует получению микрозелени *Linum usitatissimum* с самым высоким уровнем антиоксидантов и других полезных для здоровья соединений [65]. Также в ходе одного из исследований было продемонстрировано, что в условиях засоления синий свет и флуоресцентный светодиодный свет индуцируют повышенные уровни синигрина, фенольных соединений и антиоксидантов в микрозелени *Brassica carinata* L., что сопровождается увеличением активности супероксиддисмутазы и каталазы [66]. Эксперимент в помещении показал, что дополнительное освещение с длиной волны 520 и 622 нм более эффективно снижает уровень нитратов, а показатели антиоксидантной системы улучшаются с помощью диодов с длиной волны 595 нм. Установлено положительное влияние УФ-А-излучения на антиоксидантные соединения, но на параметры роста такое влияние было незначительным. Дополнительное УФ-А-излучение с длиной волны 366 и 390 нм было более благоприятным для накопления антиоксидантов. Кратковременное освеще-

ние в течение трех дней перед сбором урожая с высоким уровнем плотности потока фотосинтетических фотонов (PPFD) красными (638 нм) светодиодами увеличивало количество вторичных метаболитов микрозелени в обоих условиях выращивания. Исследования показали, что различное светодиодное освещение может быть эффективным способом для производства микрозелени с высоким содержанием питательных веществ и специфическим профилем антиоксидантов [67]. Выбор питательной среды или субстрата также влияет на содержание антиоксидантов в микрозелени. Выбор питательной среды, будь то почвенная или гидропонная, оказывает существенное влияние на доступность и усвоение питательных веществ, что, в свою очередь, влияет на синтез антиоксидантов в микрозелени. Например, при выращивании микрозелени с использованием смеси 30% вермикулита, 30% опилок, 10% перлита и 30% грибов наблюдалось увеличение активности антиоксидантных ферментов, таких как пероксидаза (POD) и аскорбатпероксидаза (APX) [68]. Снижение питательных веществ привело к снижению концентрации каротиноидов, фенольных соединений, нитратов и антиоксидантов в семядолях кресс-салата редиса, тогда как в его стеблях наблюдалось увеличение фенолов и антоцианов. Аналогичные тенденции наблюдались и у кресс-салата, хотя влияние на каротиноиды и антоцианы различалось. Повышенное содержание минералов положительно повлияло на сенсорное восприятие, выявив несоответствие между сенсорными и пищевыми свойствами [69].

Сбор микрозелени на оптимальной стадии роста обеспечивает более высокое содержание антиоксидантов, а правильные методы после сбора урожая помогают сохранить антиоксиданты во время хранения [29]. Температура хранения существенно влияет на атмосферу упаковки, качество продукции и срок годности: 1°C является оптимальной температурой, не допускающей повреждения от переохлаждения. Скорость пропускания кислорода (OTR) упаковочной пленки влияет на состав газа, в то время как обработка хлором первоначально снижает микробные популяции, но после 7 дней происходит восстановление [70]. Чтобы продлить срок хранения микрозелени подсолнечника, была применена обработка недорогими и безопасными химикатами, такими как пары этанола, лимонная кислота и аскорбиновая кислота, что привело к увеличению срока хранения до 16 дней. Обработки аскорбиновой кислотой и лимонной кислотой + аскорбиновой кислотой

оказались наиболее эффективными для сохранения питательных свойств и продления срока хранения [71]. В исследовании микрозелени рукколы, редиса и красной капусты установлено, что хранение при температуре 4°C продлевает срок хранения на 14 дней для рукколы и красной капусты и на 21 день для редиса. Однако хранение при температуре 10°C сокращало срок хранения краснокочанной капусты и рукколы до 7 дней и редиса до 14 дней. Частота дыхания при сборе урожая и во время хранения коррелировала с изменениями качества зелени. В течение второй недели частота дыхания значительно увеличилась, что можно объяснить деятельностью микроорганизмов, участвующих в разложении или расщеплении органического вещества [72].

Проблемы и перспективы

Изучение всего потенциала микрозелени и восполнение некоторых пробелов требует дополнительных исследований. С этой целью целесообразно провести углубленные исследования микроэлементного, витаминного и фитохимического содержания различных видов микрозелени. Это позволит более тщательно понять их питательные преимущества и различия. Необходимы дополнительные исследования, чтобы определить, какие антиоксиданты придают микрозелени высокую антиоксидантную активность и как они действуют в отношении заболеваний, связанных с окислительным стрессом.

Оптимизация выращивания микрозелени – еще одна область, требующая дальнейшего изучения. На развитие биологически активных соединений, вкусовые характеристики и внешнюю привлекательность влияют световой спектр, интенсивность, продолжительность и среда выращивания [1]. Микрозелень имеет короткий срок хранения, поэтому необходимо провести дальнейшие исследования по изучению методов обработки после сбора урожая, чтобы обеспечить максимальное сохранение ее пищевой ценности [8]. Одним из направлений исследований является поиск наилучших условий хранения, подходящего вида упаковки и современных способов обработки. Учитывая, что микрозелень часто едят сырой, обеспечение ее безопасности имеет решающее значение. Пищевая ценность микрозелени должна быть сохранена посредством исследования эффективных методов санитарной обработки. Также следует продолжить изучение потребительского спроса и перспектив использования в кулинарии. Кулинарный потенциал, вкусовые характеристики и совместимость различных видов

микрозелени требуют дальнейшего изучения. Использование в полной мере микрозелени как здорового и устойчивого источника пищи можно реализовать, восполнив эти пробелы в знаниях и проведя дальнейшие исследования в этих областях.

Способы повышения антиоксидантной активности микрозелени

Для повышения уровня антиоксидантов в микрозелени можно использовать несколько способов. Прежде всего, решающее значение имеет выбор подходящих сортов микрозелени с высокой антиоксидантной способностью. Различные виды и сорта микрозелени могут значительно различаться по своему антиоксидантному составу. Таким образом, выявление и выбор сортов с естественным высоким содержанием антиоксидантов может служить отправной точкой для максимизации уровня антиоксидантов [2].

Условия выращивания микрозелени играют значительную роль в определении содержания в ней антиоксидантов. Оптимизация факторов окружающей среды, таких как интенсивность, продолжительность и качество света, а также температура, влажность и доступность питательных веществ, может влиять на синтез и накопление антиоксидантов. Обеспечение идеальных условий выращивания, адаптированных к конкретным сортам микрозелени, может способствовать существенному увеличению их антиоксидантной активности. Например, регулировка спектра света с помощью специальных светодиодных ламп может повысить выработку определенных антиоксидантов [8].

Другой способ выращивания микрозелени предполагает применение экзогенных элиситоров или биостимуляторов. Эти вещества, в том числе регуляторы роста растений, элиситоры и органические добавки, могут стимулировать выработку антиоксидантов в растениях [73]. Регуляторы роста растений, группа химических соединений, влияющих на рост и развитие растений, делятся на пять основных групп: ауксин, гиббереллиновая кислота, цитокинин, этилен и абсцизовая кислота. Например, применение гиббереллиновой кислоты в концентрации 5 мкМ к растениям привело к заметному увеличению активности антиоксидантных ферментов [74]. Элиситоры – агенты, способные инициировать выработку фитоалексинов и активировать различные защитные механизмы растений. Исследование показало, что соли натрия, а именно 0,01 М NaCl и 0,1 М Na₂SO₄, вызывают наиболее значительную антиоксидантную активность в микрозелени белокочанной капусты [75].

Биостимуляторы растений – это вещества и/или микроорганизмы, которые при применении к растениям или ризосфере активируют естественные процессы, направленные на улучшение усвоения питательных веществ, эффективность использования питательных веществ, устойчивость к стрессу окружающей среды и общее качество урожая [76]. Примеры биостимуляторов включают гуминовые и фульвокислоты, экстракты морских водорослей, жидкий навозный компост, полезные микроорганизмы и грибы. Было документально подтверждено, что применение биостимуляторов повышает уровень антиоксидантов в микрозелени редиса [77]. Органические добавки – это материалы, добавляемые или смешиваемые с верхним слоем почвы для изменения характеристик почвы и содействия развитию растений. Распространенными примерами органических добавок являются вермикаст, компост, навоз, твердые биологические вещества, опилки и древесная зола. Примечательно, что применение сухого вермикаста, гумата калия и вулканических минералов значительно увеличивает антиоксидантную способность микрозелени капусты [78].

Абиотические стрессы также могут повлиять на рост и качество сельскохозяйственных культур. Растения реагируют физиологическими, биохимическими и молекулярными изменениями. Эти стрессы индуцируют вторичные метаболиты растений, имеющие преимущества для защиты и здоровья человека, такие как противовоспалительные и антиоксидантные свойства [79].

Сбор микрозелени на оптимальной стадии роста имеет решающее значение для максимального увеличения содержания в ней антиоксидантов. Например, микрозелень семейства *Brassica* рекомендуется собирать на 7-й день после прорастания [56]. Хотя у большинства микрозелени настоящие листья обычно полностью формируются между 8-м и 10-м днями, есть исключения, такие как пальчатое просо и красный амарант. Появление у них настоящих листьев задерживается и происходит на 13-й и 14-й день соответственно [80]. Таким образом, своевременный сбор урожая, когда микрозелень достигла максимального уровня антиоксидантов, может помочь обеспечить максимальное содержание антиоксидантов в конечном продукте.

Методы обработки после сбора урожая также играют важную роль в сохранении и максимальном увеличении содержания антиоксидантов в микрозелени [1]. Сведение к минимуму времени обработки и хранения, а также использование надлежащих условий хранения, таких как контроль

температуры и влажности, могут помочь предотвратить деградацию антиоксидантов [81]. Например, микрозелень горчицы продемонстрировала максимальную антиоксидантную активность и органолептические показатели качества от умеренного до хорошего при хранении при температуре 5 °С в течение 14 дней [81]. Аналогичным образом у микрозелени редиса высокие показатели качества установлены при хранении с температурой 5 °С, а максимальные показатели наблюдались при 10 °С в течение того же 14-дневного периода хранения. Как для микрозелени горчицы, так и для редиса органолептические показатели значительно ухудшаются при хранении при температуре, превышающей 15 °С [70]. Инновационные упаковочные материалы с модифицированной атмосферой также могут способствовать поддержанию уровня антиоксидантов во время хранения. Учитывая комплексные органолептические свойства, микрозелень горчицы рекомендуется хранить в полиэтиленовых пакетах толщиной 150 мкм при температуре 5 °С с целью сохранения потребительской привлекательности в течение 14-дневного срока хранения [81].

Потенциальное применение микрозелени

По прогнозам, рынок микрозелени вырастет с 230,99 млрд долл. США в 2023 г. до 315 млрд долл. США к 2028 г., при этом совокупный годовой темп роста (CAGR) составит 6,40% в течение прогнозируемого периода с 2023 по 2028 г. [82]. Одной из областей, где микрозелень находит все большее применение, является общественное питание. Кафе, рестораны и домохозяйки добавляют их в блюда, чтобы придать им визуально привлекательный вид, уникальную текстуру и насыщенный вкус. Микрозелень используется в качестве гарниров, ингредиентов для салатов и усилителей вкуса в различных кухнях [17].

Разные виды микрозелени приобретают всемирную популярность как свежие, легкоусвояемые функциональные и нутрицевтические продукты питания, а также пищевые добавки [83; 84]. Высокое содержание фитохимических веществ, включая полифенолы, флавоноиды, каротиноиды, витамины, микро- и макроэлементы, создает перспективу широкого использования для разнообразия и улучшения рациона питания человека и решения проблемы дефицита питательных веществ [3]. Кроме того, микрозелень служит ценным материалом для изучения растительных соединений и их взаимодействия с биологическими системами в фармацевтических исследованиях

и разработках для оценки биодоступности, токсичности и механизмов действия различных биологически активных соединений. Исследования микрозелени *Brassicaceae* показали, что ключевые соединения, такие как глюкозинолаты, изотиоцианаты и фенольные соединения, остаются биодоступными даже после желудочно-кишечного пищеварения *in vitro* [85]. Микрозелень может служить эффективной моделью в доклинических исследованиях для оценки терапевтических преимуществ, безопасности и механизмов действия натуральных продуктов. Например, в модели на грызунах, изучавшей ожирение, вызванное диетой, добавление микрозелени красной капусты успешно противодействовало увеличению веса из-за диеты с высоким содержанием жиров. Микрозелень капусты также значительно снизила уровень холестерина ЛПНП и показатели воспаления печени и холестерина. Это говорит о том, что микрозелень может играть роль в защите от сердечно-сосудистых заболеваний, помогая контролировать уровень холестерина [86]. Исследования показали, что водные экстракты микрозелени, такой как зеленый горошек, соя и различные виды редиса, эффективно снижают пролиферацию клеток в культурах саркомы. На антипролиферативные эффекты повлиял тип освещения: флуоресцентное или светодиодное, с преобладающим спектральным пиком синего цвета [87].

Кроме того, благодаря высокому содержанию витаминов, минералов, антиоксидантов и фитохимических веществ микрозелень имеет большие перспективы использования в качестве продуктов питания функционального и профилактического назначения. Микрозелень можно легко добавлять в соки, смузи, салаты, сэндвичи и наборы для здорового питания, обеспечивая удобный и приятный способ увеличить потребление питательных веществ.

Сельскохозяйственный сектор предлагает еще одну потенциальную рыночную возможность для микрозелени. Достижения в области вертикального земледелия, гидропоники и городского сельского хозяйства позволяют выращивать микрозелень в контролируемых условиях с минимальным пространством и ресурсами [13; 88]. Возможность выращивать микрозелень на местном уровне и в течение всего года дает возможность мелким фермерам, городским предпринимателям и общественным садоводам поставлять свежую местную микрозелень на близлежащие рынки и в рестораны.

Более того, спрос на устойчивые и экологически чистые продукты питания создал нишу рынка для органических продуктов

местного производства. Микрозелень с ее коротким циклом выращивания и высокой урожайностью можно выращивать с использованием органических методов и с минимальным воздействием на окружающую среду. Это соответствует запросам потребителей, которые отдают приоритет органическим и экологически чистым продуктам питания, что дает производителям микрозелени потенциальные возможности выделить свою продукцию и выйти на специализированные рынки. Наконец, микрозелень открывает новые возможности в сфере общественного питания, включая отели, кафе и предприятия общественного питания. Их способность улучшать внешний вид и вкус блюд, а также их питательные свойства делают микрозелень привлекательным ингредиентом для этих заведений. Микрозелень можно добавлять в различные блюда, например в бутерброды, роллы, супы и гарниры, придавая меню свежесть и изысканность. Необходимо продолжить научные исследования по изучению последствия включения микрозелени в рацион для смягчения хронических заболеваний, связанных с окислительным стрессом. Следует изучать механизмы, с помощью которых антиоксиданты микрозелени могут оказывать положительное влияние на здоровье, включая уменьшение окислительного повреждения, воспаления и укрепление защитных систем. Эти результаты будут способствовать большему пониманию нами содержания антиоксидантов в микрозелени и ее пользы для здоровья, информируя исследователей, врачей и специалистов по питанию об их потенциале устойчивого диетического продукта.

Заключение

Результаты проведенного обзора научных исследований подтверждают, что микрозелень является ценным источником антиоксидантов, таких как витамины С и Е, каротиноиды и фенольные соединения. Эти антиоксиданты играют ключевую роль в борьбе с окислительным стрессом и приносят целый ряд преимуществ для здоровья: от здоровья сердечно-сосудистой системы до контроля диабета и потенциальных противораковых эффектов. Однако содержание антиоксидантов может различаться в зависимости от таких факторов, как вид растения, условия окружающей среды и время сбора урожая. Микрозелень имеет широкие перспективы использования в качестве продукта функционального и профилактического назначения, поэтому решающее значение имеет необходимость проведения дальнейших целевых научных исследований. Эти исследования должны

быть сосредоточены на оптимизации методов выращивания, изучении поглощения антиоксидантов и их потенциального применения в функциональных продуктах питания и нутрицевтиках. Продолжающиеся исследования необходимы для полного использования преимуществ микрозелени для здоровья и питания.

Список литературы

1. Zhang Y., Xiao Z., Ager E., Kong L. & Tan L. Nutritional quality and health benefits of microgreens, a crop of modern agriculture // *Journal of Future Foods*. 2021. Vol. 1. P. 58–66. DOI: 10.1016/j.jfutfo.2021.07.001.
2. Tan L., Nuffer H., Feng J., Kwan S.H., Chen H., Tong X., Kong L. Antioxidant properties and sensory evaluation of microgreens from commercial and local farms // *Food Science and Human Wellness*. 2020. Vol. 9 (1). P. 45–51. DOI: 10.1016/j.fshw.2019.12.002.
3. Bhaswant M., Shanmugam D.K., Miyazawa T., Abe C., Miyazawa T. Microgreens—a comprehensive review of bioactive molecules and health benefits // *Molecules*. 2023. Vol. 28. P. 867. DOI: 10.3390/molecules28020867.
4. Sharma D., Shree B., Kumar S., Kumar V., Sharma S., Sharma S. Stress induced production of plant secondary metabolites in vegetables: functional approach for designing next generation super foods // *Plant Physiology and Biochemistry*. 2022. Vol. 192. P. 252–272. DOI: 10.1016/j.plaphy.2022.09.034.
5. Kumar S., Saini R., Suthar P., Kumar V., Sharma R. Plant secondary metabolites: their food and therapeutic importance // *Plant Secondary Metabolites: Physico-Chemical Properties and Therapeutic Applications* (edited by A.K. Sharma & A. Sharma). 2022. P. 371–413. Singapore: Springer Nature Singaporehttp. DOI: 10.1007/978981-16-4779-6_12.
6. Arumugam R., Elanchezian B., Samidurai J. & Amirthaganesan K. Comparative antioxidant, antibacterial and phytochemical analysis of roots, stems, leaves and seeds from *Cleome rutidosperma* DC // *Natural Resources for Human Health*. 2022. Vol. 2. P. 479–484. DOI: 10.53365/nrfhh/146009.
7. Choe U., Yu L.L., Wang T.T.Y. The science behind microgreens as an exciting new food for the 21st century // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2018. Vol. 66. P. 11519–11530. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b03096.
8. Mlinarić S., Piškor A., Melnjak A., Mikuška A., Šrajter Gajdošik M. & Begović L. Antioxidant capacity and shelf life of radish microgreens affected by growth light and cultivars // *Horticulturae*. 2023. Vol. 9. P. 76. DOI: 10.3390/horticulturae9010076.
9. Pinto E., Almeida A.A., Aguiar A.A. & Ferreira I.M.P.L.V.O. Comparison between the mineral profile and nitrate content of microgreens and mature lettuces // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2015. Vol. 37. P. 38–43. DOI: 10.1016/j.jfca.2014.06.018.
10. Lenzi A., Orlandini A., Bulgari R., Ferrante A., Bruschi P. Antioxidant and mineral composition of three wild leafy species: a comparison between microgreens and babygreens // *Food*. 2019. Vol. 8. P. 487. DOI: 10.3390/foods8100487.
11. Kowitcharoen L., Phornvillay S., Lekham P., Pongprasert N., Srilaong V. Bioactive composition and nutritional profile of microgreens cultivated in Thailand // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. P. 7981. DOI: 10.3390/app11177981.
12. Пашкевич А.М., Рупасова Ж.А., Чайковский А.И. и др. Генотипические особенности биофлавоноидного комплекса микрозелени гороха овощного // *Экологические системы и приборы*. 2023. № 3. С. 14–20. DOI: 10.25791/esip.3.2023.1357.
13. Du M., Xiao Z. & Luo Y. Advances and emerging trends in cultivation substrates for growing sprouts and microgreens toward safe and sustainable agriculture // *Current Opinion in Food Science*. 2022. Vol. 46. P.100863. DOI: 10.1016/j.cofs.2022.100863.

14. Шаклеина М.Н., Алалыкин А.А., Соловьева М.С. Оценка содержания витаминов в микрозелени нескольких видов культурных растений // Химия растительного сырья. 2022. № 2. С. 165–171. UR L: <http://journal.asu.ru/cw/article/view/9988> (дата обращения: 22.11.2023).
15. Di Gioia F., Renna M. & Santamaria P. Sprouts, microgreens and “baby leaf” vegetables. In: Minimally Processed Refrigerated Fruits and Vegetables (edited by F. Yildiz & R.C. Wiley) // US, Boston, MA: Springer. 2017. P. 403–432.
16. Turner E.R., Luo Y. & Buchanan R.L. Microgreen nutrition, food safety, and shelf life: a review // Journal of Food Science. 2020. Vol. 85. P. 870–882. DOI: 10.1111/1750-3841.15049.
17. Ebert A.W. Sprouts and microgreens—novel food sources for healthy diets // Plants (Basel, Switzerland). 2022. Vol. 11. P. 571. DOI: 10.3390/plants11040571.
18. Ikram A., Saeed F., Afzaal M. et al. Nutritional and end-use perspectives of sprouted grains: a comprehensive review // Food Science & Nutrition. 2021. Vol. 9. P. 4617–4628. DOI: 10.1002/fsn3.2408.
19. Lenzi A., Orlandini A., Bulgari R., Ferrante A. & Bruschi P. Antioxidant and mineral composition of three wild leafy species: a comparison between microgreens and babygreens // Food. 2019. Vol. 8. P. 487. DOI: 10.3390/foods8100487.
20. De Falco E., Vitti A., Celano G. & Ronga D. Suitability of on-Farm Green Compost for the Production of Baby Leaf Species // Horticulturae. 2021. Vol. 7. P. 512. DOI: 10.3390/horticulturae7110512.
21. Ronga D., Setti L., Salvarani C. et al. Effects of solid and liquid digestate for hydroponic baby leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation // Scientia Horticulturae. 2019. Vol. 244. P. 172–181. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.09.037.
22. Martínez-Ispizua E., Calatayud Á., Marsal J.I. et al. The nutritional quality potential of microgreens, baby leaves, and adult lettuce: an underexploited nutraceutical source // Food. 2022. Vol. 11. P. 423. DOI: 10.3390/foods11030423.
23. Das M. & Dhar A. Nutritional and functional quality of mustard and coriander greens at different phases of development // Current Research in Nutrition and Food Science Journal. 2023. Vol. 11. P. 153–163. DOI: 10.12944/CRNFSJ.11.1.10.
24. Biró-Janka B., Nyárádi I.-I., Duda M.M., Demeter B. & Nagygyörgy A. Changes in germination parameters of seven sweet basil (*L.*) varieties due to treating with gibberellic and ascorbic acids // Acta Univ. Sapientiae. Agriculture and Environment. 2019. Vol. 11. P. 83–94. DOI: 10.2478/ausae-2019-0008.
25. Bulgari R., Negri M., Santoro P. & Ferrante A. Quality evaluation of indoor-grown microgreens cultivated on three different substrates // Horticulturae. 2021. Vol. 7. P. 7. DOI: 10.3390/horticulturae7050096.
26. Moraru P.I., Rusu T. & Mintas O.S. Trial protocol for evaluating platforms for growing microgreens in hydroponic conditions // Foods. 2022. Vol. 11. P. 1327. DOI: 10.3390/foods11091327.
27. Xu X., Zhang L., Cao X. et al. Cotyledons facilitate the adaptation of early-maturing soybean varieties to high-latitude long-day environments // Plant Cell & Environment. 2021. Vol. 44. P. 2551–2564. DOI: 10.1111/pce.14120.
28. Cao J., Li X., Chen L., He M. & Lan H. The developmental delay of seedlings with cotyledons only confers stress tolerance to *Suaeda aralocaspica* (Chenopodiaceae) by unique performance on morphology, physiology, and gene expression // Front Plant Science. 2022. Vol. 13. P. 844430. DOI: 10.3389/fpls.2022.844430.
29. Dhaka A.S., Dikshit H.K., Mishra G.P. et al. Evaluation of growth conditions, antioxidant potential, and sensory attributes of six diverse microgreens species // Agriculture. 2023. Vol. 13. P. 676. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.3c00040.
30. Miguel M.G. Betalains in some species of the Amaranthaceae family: a review // Antioxidants (Basel, Switzerland). 2018. Vol. 7. P. 53. DOI: 10.3390/antiox7040053.
31. Liubertas T., Kairaitis R., Stasiule L. et al. The influence of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) dietary nitrates on the aerobic capacity of physically active young persons // Journal of the International Society of Sports Nutrition. 2020. Vol. 17. P. 37. DOI: 10.1186/s12970-020-00366-5.
32. Thiviya P., Gamage A., Piumali D., Merah O. & Madhujith T. Apiaceae as an important source of antioxidants and their applications // Cosmetics. 2021. Vol. 8. P. 111. DOI: 10.3390/cosmetics8040111.
33. Chadwick M., Trewin H., Gawthrop F. & Wagstaff C. Sesquiterpenoids lactones: benefits to plants and people // International Journal of Molecular Sciences. 2013. Vol. 14. P. 12780–12805. DOI: 10.3390/ijms140612780.
34. Abdel-Massih R.M., Debs E., Othman L., Attieh J. & Cabrero F.M. Glucosinolates, a natural chemical arsenal: more to tell than the myrosinase story // Frontiers in Microbiology. 2023. Vol. 14. P. 1130208. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1130208.
35. Zeng W., Tao H., Li Y. et al. The flavor of Chinese kale sprouts is affected by genotypic variation of glucosinolates and their breakdown products // Food Chemistry. 2021. Vol. 359. P. 129824. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129824.
36. de la Fuente B., López-García G., Mániz V., Alegría A., Barberá R. & Cilla A. Antiproliferative effect of bioaccessible fractions of four Brassicaceae microgreens on human colon cancer cells linked to their phytochemical composition // Antioxidants (Basel, Switzerland). 2020. Vol. 9. P. 368. DOI: 10.3390/antiox9050368.
37. Silva P.H.S., Filho A.B.C., dos Santos Reis I., Reyes S.M.R. & de Macêdo Cruz M. Nitrogen rates on growth, yield and nitrate foliar content of arugula // Revista Caatinga. 2021. Vol. 34. P. 380–387. DOI: 10.1590/1983-21252021v34n214rc.
38. Silva P.H.S., dos Santos Reis I., Nascimento C.S., Nascimento C.S. & Cecílio Filho A.B. Characterization of growth and visual symptoms of nitrogen, potassium and magnesium deficiencies in arugula // Emirates Journal of Food and Agriculture. 2021. Vol. 33. P. 575–582. DOI: 10.9755/ejfa.2021.v33.i7.2722.
39. Nandini D.B., Rao R.S., Deepak B.S. & Reddy P.B. Sulforaphane in broccoli: the green chemoprevention! Role in cancer prevention and therapy // Journal of Oral and Maxillofacial Pathology. 2020. Vol. 24. P. 405. DOI: 10.4103/jomfp.jomfp_126_19.
40. Calderón Bravo H., Vera Céspedes N., Zura-Bravo L. & Muñoz L.A. Basil seeds as a novel food, source of nutrients and functional ingredients with beneficial properties: a review // Food. 2021. Vol. 10. P. 1467. DOI: 10.3390/foods10071467.
41. Jakowienko P., Wójcik-Stopczyńska B. & Jadcak D. Antifungal activity of essential oils from two varieties of sweet basil (*L.*) // Journal of Fruit and Ornamental Plant Research. 2011. Vol. 74. P. 97–106. DOI: 10.2478/v10032-011-0008-4.
42. Joshi R.K. Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oil of *Ocimum basilicum* L. (sweet basil) from Western Ghats of north West Karnataka, India // Ancient Science of Life. 2014. V. 33. P. 151–156. DOI: 10.4103/0257-7941.144618.
43. Falowo A.B., Mukumbo F.E., Idamokoro E.M., Afolayan A.J. & Muchenje V. Phytochemical constituents and antioxidant activity of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) essential oil on ground beef from Boran and Nguni cattle // International Journal of Food Science. 2019. Vol. 1. P. 2628747. DOI: 10.1155/2019/2628747.
44. Dalal N. & Siddiqui S. Evaluation of effects of chemical treatments on sensory attributes of sunflower microgreens with storage // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 2020. Vol. 9. P. 439–443.
45. Aoyama S. & Yamamoto Y. Antioxidant activity and flavonoid content of welsh onion (*Allium fistulosum*) and the effect of thermal treatment // Food Science and Technology Research. 2007. Vol. 13. P. 67–72. DOI: 10.3136/fstr.13.67.
46. Lee S.M., Kim D. & Kim Y.-S. The effects of antioxidants on the changes in volatile compounds in heated welsh on-

- ions (*Allium fistulosum* L.) during storage // *Molecules*. 2022. Vol. 27. P. 2674. DOI: 10.3390/molecules27092674.
47. Chakraborty A.J., Uddin T.M., Matin Zidan B.M.R. et al. *Allium cepa*: a treasure of bioactive phytochemicals with prospective health benefits // *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*. 2022. Vol. (01) 18. P. 4586318. DOI: 10.1155/2022/4586318.
48. Tesfaye A. Revealing the therapeutic uses of garlic (*Allium sativum*) and its potential for drug discovery // *Scientific World Journal*. 2021. Vol. 2021. P. 8817288. DOI: 10.1155/2021/8817288.
49. Hermund D.B. 10-Antioxidant properties of seaweed-derived substances. In: *Bioactive Seaweeds for Food Applications* (edited by Y. Qin) // Cambridge, MA: Academic Press. 2021. P. 201–221.
50. Riveros M.E., Ávila A., Schruers K. & Ezquer F. Antioxidant biomolecules and their potential for the treatment of difficult-to-treat depression and conventional treatment-resistant depression // *Antioxidants*. 2022. Vol. 11. P. 540. DOI: 10.3390/antiox11030540.
51. Sharifi-Rad M., Anil Kumar N.V., Zucca P. et al. Lifestyle, oxidative stress, and antioxidants: Back and forth in the pathophysiology of chronic diseases // *Frontiers in Physiology*. 2020. Vol. 11. P. 694. DOI: 10.3389/fphys.2020.00694.
52. Tan B.L., Norhaizan M.E., Liew W.-P.-P. & Sulaiman Rahman H. Antioxidant and oxidative stress: a mutual interplay in age-related diseases // *Frontiers in Pharmacology*. 2018. Vol. 9. P. 1162. DOI: 10.3389/fphar.2018.01162.
53. Kawata A., Murakami Y., Suzuki S. & Fujisawa S. Anti-inflammatory activity of β -carotene, lycopene and tri-n-butylborane, a scavenger of reactive oxygen species // *InVivo*. 2018. Vol. 32. P. 255–264. DOI: 10.21873/invivo.11232.
54. Jaglan P., Kumar V., Suthar P., Aleena A. & Kumar S. Advances in the profiling and characterization of antioxidants. In: *Bentham Briefs in Biomedicine and Pharmacotherapy Oxidative Stress and Natural Antioxidants* (edited by P. Kaur, R.G. Mehta, R. Tarunpreet, S. Thind & S. Arora) // Sharjah, UAE: Bentham Science Publisher. 2021. P. 171–208.
55. Rudrapal M., Khairnar S.J., Khan J. et al. Dietary polyphenols and their role in oxidative stress-induced human diseases: insights into protective effects, antioxidant potentials and mechanism(s) of action // *Frontiers in Pharmacology*. 2022. Vol. 13. P. 806470. DOI: 10.3389/fphar.2022.806470.
56. Xiao Z., Rausch S.R., Luo Y. et al. Microgreens of Brassicaceae: genetic diversity of phytochemical concentrations and antioxidant capacity // *LWT – Food Science and Technology*. 2019. V. 101. P. 731–737. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.10.076.
57. Alrifai O., Hao X., Liu R., Lu Z., Marcone M.F. & Tsao R. LED-induced carotenoid synthesis and related gene expression in brassica microgreens. // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2021. Vol. 69. P. 4674–4685. DOI: 10.1021/acs.jafc.1c00200.
58. Sharma S., Katoch V., Kumar S. & Chatterjee S. Functional relationship of vegetable colors and bioactive compounds: implications in human health // *The Journal of Nutritional Biochemistry*. 2021. Vol. 92. P. 108615. DOI: 10.1016/j.jnutbio.2021.108615.
59. Ma Z., Du B., Li J., Yang Y. & Zhu F. An insight into anti-inflammatory activities and inflammation related diseases of Anthocyanins: a review of both *in vivo* and *in vitro* investigations // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22. P. 11076. DOI: 10.3390/ijms222011076.
60. Böhm V. Vitamin E // *Antioxidants (Basel)*. 2018. Mar 20. Vol. 7(3):44. DOI: 10.3390/antiox7030044.
61. Abaajeh A.R., Kingston C.E. & Harty M.A. Environmental factors influencing the growth and pathogenicity of microgreens bound for the market: a review // *Renewable Agriculture and Food Systems*. 2023. Vol. 38. e12. DOI: 10.1017/S174217052300008X.
62. Islam M.Z., Park B.-J. & Lee Y.-T. Effect of salinity stress on bioactive compounds and antioxidant activity of wheat microgreen extract under organic cultivation conditions // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. Vol. 140. P. 631–636. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.08.090.
63. Lanoue J., St Louis S., Little C. & Hao X. Continuous lighting can improve yield and reduce energy costs while increasing or maintaining nutritional contents of microgreens // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. P. 983222. DOI: 10.3389/fpls.2022.983222.
64. Santin M., Sciampagna M.C., Mannucci A. et al. Supplemental UV-B exposure influences the biomass and the content of bioactive compounds in *Linum Usitatissimum* L. sprouts and microgreens // *Horticulturae*. 2022. Vol. 8. P. 213. DOI: 10.3390/horticulturae8030213.
65. Puccinelli M., Maggini R., Angelini L.G. et al. Can light Spectrum composition increase growth and nutritional quality of *Linum usitatissimum* L. sprouts and microgreens? // *Horticulturae*. 2022. Vol. 8. P. 98. DOI: 10.3390/horticulturae8020098.
66. Maina S., Ryu D.H., Cho J.Y. et al. Exposure to salinity and light spectra regulates glucosinolates, phenolics, and antioxidant capacity of *Brassica carinata* L. microgreens // *Antioxidants*. 2021. Vol. 10. P. 1183. DOI: 10.3390/antiox10081183.
67. Brazaitytė A., Viršilė A., Samuoliene G. et al. Light quality: growth and nutritional value of microgreens under indoor and greenhouse conditions // In: *Acta Horticulturae*. P. 277284. Belgium: International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven.
68. Saleh R., Gunupuru L.R., Lada R., Nams V., Thomas R.H. & Abbey L. Growth and biochemical composition of microgreens grown in different formulated soilless media // *Plants*. 2022. Vol. 11. P. 3546. DOI: 10.3390/plants11243546.
69. Keutgen N., Hausknecht M., Tomaszewska-Sowa M. & Keutgen A.J. Nutritional and sensory quality of two types of cress microgreens depending on the mineral nutrition // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. P. 1110. DOI: 10.3390/agronomy11061110.
70. Xiao Z., Luo Y., Lester G.E., Kou L., Yang T. & Wang Q. Postharvest quality and shelf life of radish microgreens as impacted by storage temperature, packaging film, and chlorine wash treatment // *LWT – Food Science and Technology*. 2014. Vol. 55. P. 551–558. DOI: 10.1016/j.lwt.2013.09.009.
71. Dalal N., Siddiqui S. & Phogat N. Post-harvest quality of sunflower microgreens as influenced by organic acids and ethanol treatment // *Journal of Food Processing & Preservation*. 2020. Vol. 44. e14678. DOI: 10.1111/jfp.14678.
72. Berba K.J. & Uchanski M. Post-harvest physiology of microgreens // *Journal of Young Investigators*. 2012. Vol. 24. P. 5.
73. Toscano S., Ferrante A., Branca F. & Romano D. Enhancing the quality of two species of baby leaves sprayed with Moringa leaf extract as biostimulant // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. P. 1399. DOI: 10.3390/agronomy11071399.
74. Jaleel C.A., Salem M.A., Hasanuzzaman M. & Nahar K. Plant growth regulator interactions results enhancement of antioxidant enzymes in *Catharanthus roseus* // *Journal of Plant Interactions*. 2010. Vol. 5. P. 135–145. DOI: 10.1080/17429140903377456.
75. Patras A. Effects of development stage and sodium salts on the antioxidant properties of white cabbage microgreens // *Agriculture*. 2021. Vol. 11. P. 200. DOI: 10.3390/agriculture11030200.
76. Brown P. & Saa S. Biostimulants in agriculture // *Front Plant Science*. 2015. Vol. 6. P. 671. DOI: 10.3389/fpls.2015.00671.
77. Toscano S., Romano D. & Patané C. Effect of application of biostimulants on the biomass, nitrate, pigments, and antioxidants content in radish and turnip microgreens // *Agronomy*. 2023. Vol. 13. P. 145. DOI: 10.3390/agronomy13010145.
78. Saleh R., Gunupuru L.R., Lada R., Nams V., Thomas R.H. & Abbey L. Growth and biochemical composition of micro-

- greens grown in different formulated soilless media // *Plants*. 2022. Vol. 11. P. 3546. DOI: 10.3390/plants11243546.
79. Sharma S., Shree B., Sharma D. et al. Vegetable microgreens: the gleam of next generation super foods, their genetic enhancement, health benefits and processing approaches // *Food Research International*. 2022. Vol. 155. P. 111038 DOI: 10.1016/j.foodres.2022.111038.
80. Senevirathne G.I., Gama-Arachchige N.S., Karunaratne A.M. Germination, harvesting stage, antioxidant activity and consumer acceptance of ten microgreens // *Ceylon Journal of Science*. 2019. Vol. 48. P. 91–96. DOI: 10.4038/cjs.v48i1.7593.
81. Dayarathna N.N., Gama-Arachchige N.S., Damunupola J.W. et al. Effect of storage temperature on storage life and sensory attributes of packaged mustard microgreens // *Life*. 2023. Vol. 13 (2). P. 393 DOI: 10.3390/life13020393.
82. Mordor Intelligence™ Industry Reports. Microgreens market size & share analysis – growth trends & forecasts (2023–2028). 2023.
83. Gupta A., Sharma T., Singh S.P., Bhardwaj A., Srivastava D. & Kumar R. Prospects of microgreens as budding living functional food: breeding and biofortification through OMICS and other approaches for nutritional security // *Frontiers in Genetics*. 2023. Vol. 14. P. 1053810. DOI: 10.3389/fgene.2023.1053810.
84. Dereje B., Jacquier J.-C., Elliott-Kingston C., Harty M. & Harbourne N. Brassicaceae microgreens: phytochemical compositions, influences of growing practices, postharvest technology, health, and food applications // *ACS Food Science & Technology*. 2023. Vol. 3. P. 981–998. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.3c00040.
85. Alloggia F.P., Bafumo R.F., Ramirez D.A., Maza M.A. & Camargo A.B. Brassicaceae microgreens: a novel and promissory source of sustainable bioactive compounds // *Current Research in Food Science*. 2023. Vol. 6. P. 100480 DOI: 10.1016/j.crf.2023.100480.
86. Huang H., Jiang X., Xiao Z. et al. Red cabbage microgreens lower circulating low-density lipoprotein (LDL), liver cholesterol, and inflammatory cytokines in mice fed a high-fat diet // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2016. Vol. 64. P. 9161–9171. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b03805.
87. Truzzi F., Whittaker A., Roncuzzi C., Saltari A., Levesque M.P., Dinelli G. Microgreens: functional food with antiproliferative cancer properties influenced by light // *Foods (Basel, Switzerland)*. 2021. Vol. 10. P. 1690. DOI: 10.3390/foods10081690.
88. Oh S. & Lu C. Vertical farming – smart urban agriculture for enhancing resilience and sustainability in food security // *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 2023. Vol. 98. P. 133–140. DOI: 10.1080/14620316.2022.2141666.