

Научная статья
УДК 58.084.1
DOI: 10.31857/S0869769824060013
EDN: НТСУНА

Влияние состава почвенных смесей на морфогенез и продуктивность руколы, культивируемой в условиях светодиодного освещения

Ю. Н. Кульчин, С. О. Кожанов✉, А. С. Холин, Е. П. Субботин,
Н. И. Субботина, А. С. Гомольский, О. О. Слугина

Юрий Николаевич Кульчин
академик РАН, доктор физико-математических наук
Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
kulchin@iacp.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8750-4775>

Сергей Олегович Кожанов
младший научный сотрудник
Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
kozhanov_57@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-2629-3521>

Александр Сергеевич Холин
научный сотрудник
Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
a_kholin@dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9751-5136>

Евгений Петрович Субботин
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
s.e.p@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8658-3504>

Наталья Ивановна Субботина
младший научный сотрудник
Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
sale789@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0945-3877>

Андрей Сергеевич Гомольский
аспирант
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
gomolskii.as@dvfu.ru
<https://orcid.org/0009-0003-5606-9648>

Ольга Олеговна Слугина

студентка

Передовая инженерная школа «Институт биотехнологий, биоинженерии и пищевых систем», Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

slugina.oo@dvfu.ru

<https://orcid.org/0009-0008-0805-4544>

Аннотация. Проведена оценка воздействия различных почвенных смесей на развитие растений руколы (*Eruca sativa* Mill.), культивируемой в условиях искусственного освещения. В исследованиях использовались смеси на основе почвогрунта, универсального для садово-огородных растений (почва), песка, сапропеля и универсального ионитного питательного субстрата «Цион» в различных пропорциях. Растения выращивались в закрытых фитобоксах со светодиодным освещением, при облучении белым светом (WW) с интенсивностью 300 мкмоль/с м² и фотопериодом свет/темнота 16/8 ч. В качестве контроля использовалась рукола, выращенная в почвогрунте без примесей. Соотношение спектров использованного света WW, в %, в диапазоне красный–зеленый–синий составляло R33:G41:B26. Проведенный анализ показал, что наибольшие значения сырой массы, общей площади листа и количества листьев растений были достигнуты в опыте Почва + Цион (ПВ) соответственно. В опытах Почва + Песок + Цион (ПП) и ПВ отмечено увеличение общей площади листьев, сырого веса и числа листьев в сравнении с контролем. Наивысшая продуктивность достигнута в опыте ПВ. Результаты показали, что применение универсального ионообменного питательного субстрата привело к улучшению характеристик в большинстве опытных смесей в сравнении с другими опытами и контролем. Результат применения сапропеля для руколы был отрицательным. Почвенные смеси ПВ и ПП были наилучшими для развития растений руколы и могут быть использованы для оптимизации качества и сроков выращивания растений.

Ключевые слова: почвенная смесь, песок, удобрение, морфометрические характеристики, содержание сухого вещества, рукола

Для цитирования: Кульчин Ю.Н., Кожанов С.О., Холин А.С., Субботин Е.П., Субботина Н.И., Гомольский А.С., Слугина О.О. Влияние состава почвенных смесей на морфогенез и продуктивность руколы, культивируемой в условиях светодиодного освещения // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 6. С. 5–17. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824060013>

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2022-1143 от 07 июля 2022 г.).

Original article

LED cultivated *Eruca sativa* morphogenesis and productivity in different soil mixtures

Yu. N. Kulchin, S. O. Kozhanov, A. S. Kholin, E. P. Subbotin,
N. I. Subbotina, A. S. Gomolsky, O. O. Slugina

Yuriy N. Kulchin

Academician of RAS, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics

Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia

kulchin@iacp.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8750-4775>

Sergey O. Kozhanov

Junior Researcher

Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia

kozhanov_57@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0001-2629-3521>

Aleksandr S. Kholin

Researcher

Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia

a_kholin@dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9751-5136>

Evgeniy P. Subbotin

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Leading Researcher

Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia

s.e.p@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8658-3504>

Natalia I. Subbotina

Junior Researcher

Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia

sale789@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0945-3877>

Andrey S. Gomolsky

Graduate Student

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

gomolskii.as@dvfu.ru

<https://orcid.org/0009-0003-5606-9648>

Olga O. Slugina

Student

Advanced Engineering School “Institute of Biotechnology, Bioengineering

and Food Systems” of the Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

slugina.oo@dvfu.ru

<https://orcid.org/0009-0008-0805-4544>

Abstract. The main purpose of work was to assess how different soil mixtures could affect the productivity of plants with other conditions being equal and find the most productive treatment. The other purpose was to show that the addition of fertilizer could be more efficient in comparison with hydroponics methods. The methods used in this work include LEDs light sources development, morphometric parameters estimation, and statistical analysis. In our research, we used mixtures based on universal soil, sand, sapropel and the Zion universal ion-exchange nutrient substrate in various proportions. 100% soil was used as a control. The plants were grown under white light (WW) with an intensity of 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and RGB range percent ratio R33:G41:B26. Results. The highest values of fresh weight, total leaf area, and plant leaves number were achieved under the Soil + Zion conditions, respectively. Under the Soil + Sand + Zion and Soil + Zion conditions, the total leaf area, wet weight and leaves number were increased in comparison with the control. The highest productivity was reached in the Soil + Zion experiment. The results demonstrated that the use of a universal ion-exchange nutrient substrate resulted in improved performance in most of the experimental mixtures in comparison with other experiments and control. Soil mixtures with ion-exchange nutrient substrates has advantages to other soil mixtures and can be used to optimize the quality and timing of plant growth.

Keywords: ion-exchange nutrients, sand, fertilizer, morphometry, *Eruca sativa*, dry matter content

For citation: Kulchin Yu.N., Kozhanov S.O., Kholin A.S., Subbotin E.P., Subbotina N.I., Gomolsky A.S., Slugina O.O. LED cultivated *Eruca sativa* morphogenesis and productivity in different soil mixtures. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(6):5–17. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824060013>

Funding. The work was carried out with the financial support of the Russian Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2022-1143 dated July 7, 2022).

Введение

Почва и ее состав являются одним из наиболее значимых факторов [1, 2], влияющих на рост и развитие растений. Из почвы растения получают необходимые для роста и развития питательные вещества. Способность почвы отдавать корневой системе растений эти вещества определяется ее физическими и химическими свойствами. Грунт должен иметь определенную структуру, механический [2] и гранулометрический состав [3], чтобы обеспечить дренаж, водоудержание и аэрацию (оксигенацию). Гранулометрический состав определяет размер популяции микроорганизмов и, следовательно, биологическую и биохимическую функциональность почвы [4, 5]. Кроме того, содержание питательных элементов в грунте должно быть в определенных пределах для обеспечения нормального роста плодовых деревьев, овощных и зерновых культур.

Исследования воздействия почвенных смесей разных составов и добавок к ним демонстрируют различные результаты в зависимости от концентрации и типа добавок, вида растений и условий культивирования. В работе [6] установлено, что наилучшим (наиболее продуктивным) режимом для растений *Terminalia arjuna* является выращивание в почвенной смеси в соотношении песок : почва – 80:20 во время сезона дождей. Работа [7] демонстрирует, что при нехватке почвы саженцы деревьев какао целесообразно выращивать в почвенной смеси песок : почва в соотношении 1:1 при добавке листового органического удобрения, поскольку продуктивность и иные параметры были сопоставимы с контрольным опытом (100% почвы). В другой работе [1] по саженцам какао установлено, что комбинация почвы, доломита, фосфорита, органического компоста и песка привела к наилучшему результату среди иных почвенных комбинаций. В данном случае значимым компонентом оказался песок. Эффективность смеси почв разного типа (краснозем : чернозем), установлена в работе [8]. В ней показано, что данные смеси в различных пропорциях, %: 75:25, 50:50 – увеличивают продуктивность корневища *Boesenbergia rotunda* и способствуют здоровому росту стебля. Работа [9] показывает, что при разработке наилучшей почвенной смеси нет универсального решения для всех культур, но вариативность полученных результатов позволяет подобрать наилучшие режимы с учетом потребности каждой индивидуальной культуры.

Одним из наиболее перспективных направлений для увеличения продуктивности растений является разработка и применение ионообменных питательных субстратов. Наиболее легко усваиваемые растениями катионы находятся в ионообменном состоянии в виде подвижных ионов K^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} [10], подвижные катионы содержатся в различных алюмосиликатах, в частности в глинистых минералах и цеолитах. Ионообменные субстраты производятся на основе полимерных цеолитов [10] и, следовательно, обладают наиболее легко усвояемыми растениями катионами в сравнении с натуральной почвой, где большая часть катионов входит в состав кристаллических решеток различных минералов и доступна растениям в меньшей степени.

Такие субстраты впервые были разработаны в Институте физико-органической химии НАН Беларуси (ИФОХ НАН) для выращивания растений в закрытых экологических системах [11] в специфических условиях (в космосе, на арктических станциях, атомных ледоколах и других объектах), где использование обычных почв невозможно. ИФОХ НАН производит их в ограниченном количестве под торговой маркой «Биона» [12]. Они являются смесью анионитов, ионитов и ионов питательных веществ растений. Поскольку иониты обладают высокой обменной способностью, содержание питательных веществ в субстратах может превышать аналогичное в лучших натуральных почвах [13]. Применение ионообменных субстратов в малых пропорциях оказывало положительный эффект на рост растений [11] и набор корневой массы [12]. Также в работе [14] установлено, что возможно использовать ионообменный субстрат для культивации пробирочной культуры картофеля. При выращивании картофеля на ионообменном субстрате в пробирках увеличилось количество проросших растений в сравнении с контролем.

Одним из наиболее важных свойств ионообменных субстратов является их способность восстанавливать либо увеличивать плодородие малоплодородных почв. Этот факт установлен в ряде работ [11–13, 15, 16]. Как отмечено в работе [11], добавка 1% субстрата к малоплодородной почве дает прибавку к сырой массе стебля кукурузы в среднем на 185%, а 5% добавка субстрата к малоплодородной почве позволила к 6-й неделе роста достичь той же продуктивности, что была на плодородной пахотной почве.

Возможность универсального применения ионообменного субстрата для разных растений, положительный эффект для продуктивности и факт недостаточной изученности применения субстрата для выращивания руколы обусловил выбор добавки питательного субстрата в почвенную смесь для настоящей работы. Нами был выбран патентованный¹ ионитный питательный субстрат «Цион» на основе субстрата торговой марки «Биона».

В последнее время широкое применение в сельском хозяйстве получили технологии гидропоники [17, 18] и аэропоники [19], которые позволяют ускорить созревание урожая и автоматизировать процесс выращивания в будущем. Но, несмотря на незначительный проигрыш в сроках созревания культур, почвенное культивирование растений [20] остается важной отраслью сельского хозяйства, так как биохимический состав растений, выращенных на почве, и состав вторичных метаболитов выгодно отличают эти растения от вариантов с беспочвенным культивированием [21].

В качестве культуры для исследования выбрана рукола (*Eruca sativa*), поскольку она обладает большой потребительской ценностью, характеризуется быстрым ростом, коротким жизненным циклом и компактностью [22]. Рукола (*Eruca sativa*) является произрастающим повсеместно растением, листья которого имеют пряный вкус и употребляются в необработанном виде [23]. В ней содержится большое количество микро- и макроэлементов [22].

Цель работы заключалась в совершенствовании состава почвенной смеси для выращивания монокультуры зелени в закрытых помещениях для промышленного производства на примере культивирования растения рода *Eruca sativa*, для которого ранее подбор почвенных смесей не проводился.

Материалы и методы

Условия роста и почвенные смеси. Эксперимент проводился в изолированных от внешнего светового воздействия фитобоксах, оборудованных светодиодными светильниками, в лаборатории Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН (Владивосток, Российская Федерация). Экспериментальная система включала 2 фитобокса размерами 100 × 50 × 50 см, каждый фитобокс был разделен на 3 секции размерами 33 × 50 × 50 см, в каждой секции размещалось по 10 растений. Характеристики почвенных смесей приведены в табл. 1.

В каждой секции фитобокса размещались 3 одинаковых светодиодных светильника, излучающих белый свет. Светильники обеспечивали требуемый уровень PPFD, равный 300 мкмоль/с м². Интенсивность света в каждой секции фитобокса выравнивалась по-

Таблица 1

Характеристики почвенных смесей

	Состав почвенной смеси	Соотношение, %	Гранулометрический состав
1	Почва (К)	100	Средний суглинок
2	Почва + Цион (ПВ)	95:5	Средний суглинок
3	Песок + Цион (ПК)	95:5	Песок
4	Почва + Песок + Цион (ПП)	50:45:5	Легкий суглинок
5	Почва + Песок + Сапрпель + Цион (ПС1)	50:30:15:5	Легкий суглинок
6	Почва + Песок + Сапрпель + Цион (ПС2)	30:50:15:5	Супесь

¹ Пат. РФ № RU 2 662 772 C1, 2017.11.16. Питательный субстрат для выращивания растений / Д.А. Ефремов, Е.Г. Косандрович, И.О. Мельников и др. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2662772C1_20180730 (дата обращения: 23.05.2024).

средством регулирования тока питания для каждого светильника. Спектры измерялись спектрофотометром PG200N UPRtek (Тайвань). Токи питания драйверов контролировались цифровым мультиметром UT61A фирмы Uni-T (КНР). Теплый белый свет имел доминирующую длину волны излучения 580 нм.

В качестве основы для почвенных смесей использован почвогрунт «Универсальный» с содержанием элементов: азот – 160–240 мг/л, фосфор – 145–215 мг/л, калий – 180–290 мг/л, магний – 135 мг/л, гуминовые вещества – 35 мг/л, pH водного раствора – 5,5–7,0 (ООО «Терра мастер», Новосибирск, Российская Федерация). В качестве второго компонента смеси использован универсальный кварцевый песок фракцией 0,8–2,0 мм (ООО «Копиа», Домодедово, Российская Федерация). В качестве добавок удобрений был взят универсальный сапропель Biogruadka с содержанием элементов N1:P1:K1 (в%): 1,0:0,1:0,1, органическое вещество (в%) не менее 40, pH не менее 5,0 (ООО «КемиПро», Москва, Российская Федерация, ООО «БелЭкоСан», Минск, Республика Беларусь). В качестве основной добавки удобрений использован универсальный ионитный питательный субстрат «Цион» с содержанием элементов N1:P1:K1 (в мг/кг) 4960:4730:11280, pH 6,9 (ООО «Экохимпром», Петровици, Республика Беларусь).

Растительный материал и характеристики. Для эксперимента были использованы семена руколы, сорт Инда Покер, производства 2019 г. ООО «Гавриш» (Москва, Российская Федерация). Экспериментальная система включала 6 опытов, в каждом опыте было 10 растений. Семена руколы замачивались в дистиллированной воде в течение 3 дней. После этого проросшие семена высаживались в горшки (Ш × В: 9 × 10 см, ООО «Сады Приморья», Уссурийск, Российская Федерация) заполненные почвенными смесями различных пропорций. Относительная влажность поддерживалась на уровне $70 \pm 10\%$, температура – $21 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$. Полив осуществлялся один раз в три дня.

Оценка характеристик роста проводилась на 21-й день после высаживания проросших семян путем вычисления средних значений измерений 10 растений. Число, общая площадь листьев (в см^2), средняя площадь листьев (в см^2), средняя ширина, длина и периметр листьев (в см) определялись с использованием сканера Epson Perfection V850 Pro (Epson, Япония) и специализированного программного обеспечения Win Folia Pro 2020 (Regent Instruments, Великобритания). Содержание сухого вещества, % (С) определялось согласно формуле

$$C = \frac{Wd}{Wf} \times 100, \quad (1)$$

где Wd – вес сухого растения/корня, Wf – вес сырого растения/корня.

Сырой и сухой вес надземной части растения и корней получены с использованием электронных весов Ohaus EX225/AD (Ohaus Corporation, США) (0,0001 г). Продуктивность на лист (Р) вычислялась согласно формуле

$$P = \left(\frac{Wf}{100} \times C \right) \div N, \quad (2)$$

где N – число листьев.

Продуктивность корней (P_k) вычислялась согласно формуле

$$P_k = \left(\frac{Wf}{100} \times C_k \right), \quad (3)$$

где C_k – содержание сухого вещества корней.

По завершении эксперимента у 10 растений из каждого варианта почвенной смеси были измерены: число листьев; длина, ширина, площадь, периметр всех листьев; сырая и сухая масса надземной части растений и корней; сухое вещество; продуктивность. Все полученные результаты обработаны статистически с использованием пакета MSOffice.

Результаты и обсуждение

Применение различных почвенных смесей и добавок оказало значительное влияние на морфометрические характеристики, вес и показатели продуктивности растений руколы. На рисунке приведены фотографии руколы, культивировавшейся на разных почвенных смесях. В опытах с добавкой сапропеля все растения не смогли развиваться, следовательно, значения их характеристик не могли быть оценены. Морфометрические характеристики руколы приведены в табл. 2. По всем характеристикам наилучший результат наблюдался в опыте ПВ в сравнении с контролем. Сопоставимый с опытом ПВ результат по всем характеристикам наблюдался в опыте ПП. Наименьший результат отмечен в опыте ПК.

Также в опыте ПВ отмечено наибольшее среднее число листьев на растение и наибольшая общая площадь листьев. Опыт ПП обладал сопоставимыми с опытом ПВ характеристиками. Наименьшая общая площадь и число листьев отмечены в опыте ПК.

Характеристики веса и показатели продуктивности руколы приведены в табл. 3, 4.

Наибольшие вес растений и продуктивность на лист наблюдались в опыте ПВ, тогда как наибольшее содержание сухого вещества отмечено в контроле и опыте ПК. В контроле отмечена следующая наибольшая по величине за опытом ПВ продуктивность. Продуктивность опыта ПП была ниже продуктивности контрольного опыта, но на сопоставимом уровне (0,07 и 0,08 г на лист). В опыте ПК отмечено высокое содержание сухого вещества, но остальные показатели были наименьшими среди прочих опытов.

Наибольшие вес и продуктивность корней наблюдались в опыте, тогда как наибольшее содержание сухого вещества отмечено в контроле. В остальных опытах содержание сухого вещества в корнях было на сопоставимом уровне (8,14; 8,41; 9,22 %). В контроле отмечена следующая наибольшая по величине за опытом ПВ продуктивность. Продуктивность опыта ПП была ниже продуктивности контрольного опыта. Показатели опыта ПК были наименьшими среди прочих опытов, за исключением сухого вещества.

Применение почвенных смесей и добавок к ним в различных пропорциях для выращивания руколы при прочих равных условиях показало ожидаемые положительные результаты от добавки питательного субстрата и отрицательный результат применения сапропеля.



Растения руколы, выращенные при разных вариантах состава почвенной смеси, через 21 день после посадки

Таблица 2

Морфометрические характеристики руколы (через 21 день после посадки)

Опыт	Число листьев	Общая площадь листьев, см ²	Средние значения			
			Площадь листа, см ²	Ширина листа, см	Длина листа, см	Периметр листа, см
К	7,80 ± 0,68	85,56 ± 14,20	10,97 ± 1,45	2,97 ± 0,20	8,56 ± 0,81	27,76 ± 3,76
ПП	8,80 ± 1,00	197,30 ± 34,75	22,90 ± 4,96	4,21 ± 0,47	13,56 ± 1,24	47,71 ± 6,53
ПВ	9,60 ± 1,12	330,07 ± 29,52	34,84 ± 4,12	5,22 ± 0,41	16,86 ± 1,79	57,75 ± 7,13
ПК	5,30 ± 0,90	19,18 ± 6,79	3,40 ± 0,96	1,51 ± 0,22	5,29 ± 1,02	11,98 ± 1,86

Таблица 3

Весовые характеристики руколы (через 21 день после посадки)

Опыт	Вес сырого вещества, г		Сухой вес, г	
	Растения	Корни	Растения	Корни
К	3,92 ± 0,76	1,01 ± 0,55	0,60 ± 0,12	0,12 ± 0,05
ПП	9,49 ± 1,72	1,05 ± 0,28	0,59 ± 0,13	0,09 ± 0,03
ПВ	17,04 ± 1,46	1,71 ± 0,47	0,98 ± 0,09	0,14 ± 0,05
ПК	0,83 ± 0,30	0,40 ± 0,14	0,08 ± 0,02	0,04 ± 0,02

Таблица 4

Содержание сухого вещества и продуктивность руколы (через 21 день после посадки)

Опыт	Сухое вещество, растение, %	Продуктивность на лист, г	Влажность растения, %	Сухое вещество, корни, %	Продуктивность корней, г	Влажность корней, %
К	15,37 ± 2,42	0,08 ± 0,01	84,63 ± 2,42	13,38 ± 1,48	0,12 ± 0,05	86,62 ± 1,48
ПП	6,22 ± 0,44	0,07 ± 0,01	93,78 ± 0,44	8,14 ± 0,82	0,09 ± 0,03	91,86 ± 0,82
ПВ	5,75 ± 0,40	0,10 ± 0,02	94,25 ± 0,40	8,41 ± 0,72	0,14 ± 0,05	91,59 ± 0,72
ПК	11,32 ± 4,10	0,02 ± 0,003	88,68 ± 4,10	9,22 ± 2,36	0,04 ± 0,02	90,78 ± 2,36

Отсутствие развития растений в опытах с сапропелем, вероятно, возможно объяснить повышением кислотности почвы, поскольку использованный в работе тип сапропеля по показателю pH приближается к 5,0, что является показателем, близким к слабокислой среде. Кроме этого факта применение сапропеля для улучшения почвенных характеристик значительно влияет на микробиологический состав почвы [24, 25] и увеличивает присутствие в почве сахаромицетов и гифомицетов. Как было установлено в работе [26], между стимуляцией роста растений и микробиологическим составом отсутствовала корреляция, а корреляция между присутствием грибов и стимуляцией роста была отрицательной. Следовательно, изменение микробиологической и биологической среды почвы и тот факт, что воздействие сапропеля на рост растений является крайне видоспецифичным, могли обусловить отсутствие развития руколы на почвенных смесях с сапропелем.

Также установлено, что температура почвы более тесно связана со скоростью роста салата, чем температура воздуха, а уплотнение почвы может вызвать изменчивость роста салата, поскольку оно уменьшает количество корней и приток воды к корневой системе [27]. Согласно работе [28] введение в почвенную смесь добавок сапропеля 50% обусловило уменьшение объема корневой системы растений салата, но в смеси, содержащей 25% сапропеля, корневая система оказалась более развитой, чем на контроле. Тем не менее в данной работе [28] указано, что корневая система располагалась преимущественно на внешней части субстрата, что свидетельствовало о недостаточной аэрации почвы, а также подчеркивается высокая плотность сапропеля. Следовательно, в нашем опыте добавка сапропеля также могла обусловить недостаточную аэрацию почвы вследствие высокой плотности сапропеля и, соответственно, в совокупности с другими факторами, привести к отсутствию развития руколы. Согласно результатам ранее проведенных работ и нашей работы, возможно для дальнейших исследований и достижения положительных результатов рекомендовать более низкий процент добавки сапропеля.

Итоги по опытам ПП, ПВ и ПК – наилучшая продуктивность в опыте ПВ, сопоставимая с опытом ПВ продуктивность и морфометрические характеристики в опыте ПП и наименьшие результаты в опыте ПК – согласуются с результатами работы [7]. Песок обладает крайне

низкой водоудерживающей способностью, и при поливе питательный субстрат предположительно мог вымываться. Также результаты нашей работы, в которой применялся чистый кварцевый песок, согласуются с работой [24], где наилучшая продуктивность достигалась при применении песка, обогащенного микроэлементами, а применение чистого кварцевого песка в сочетании с сапропелем привело к отсутствию развития растений салата. Следовательно, указанные причины в совокупности с отсутствием элементов питания растений, представленных в почве опытов, привели к наименьшей результативности, и для дальнейших исследований возможно рекомендовать применение песка, обогащенного микроэлементами.

Применение смеси Почва + Песок + Питательный субстрат (50:45:5) (опыт ПП) продемонстрировало лучшую продуктивность и морфометрические характеристики в сравнении с контролем, что согласуется с результатами работы [1], где применение смеси Песок + Почва с добавкой определенного удобрения также приводило к лучшим результатам. Результат нашей работы согласуется с работой [11] по применению питательного субстрата, где отмечалось повышение продуктивности при применении добавки субстрата в пропорциях от 1 до 5%. Наши результаты согласуются также с работой [12], в которой отмечено повышение набора массы корней *Dactylis glomerata* при добавке 1–2% субстрата в песок, и работой [13], в которой установлено увеличение общей продуктивности *Dactylis glomerata* при добавке 2% субстрата. Добавка ионообменного субстрата в количестве 5%, использованная нами в качестве эталонной, приводила к наилучшим результатам, как и в работах [11, 16]. В данных работах [11, 16] установлено, что продуктивность истощенной почвы при добавке питательного субстрата может быть сопоставимой или превосходящей продуктивность пахотной почвы. Это согласуется с нашим результатом, в котором опыт ПП (Почва + Песок + Питательный субстрат) показал сопоставимую продуктивность с контролем и наилучшим опытом. Полученные нами результаты могут быть применены при разработке новых методологий производства питательных субстратов аналогично применению тест-растений райграса (*Lolium perenne L.*) в работе [29]. Помимо воздействия питательного субстрата к лучшей результативности мог привести улучшенный режим аэрации почвы в связи со сменой гранулометрического состава в сравнении с контролем.

Необходимость правильного подбора компонентов почвенной смеси и пропорций их смешивания, установленная в настоящей работе, согласуется с работой [8], где наилучшая результативность достигнута смешиванием определенных пропорций двух типов почв без добавок.

Согласно фактам, приведенным выше, возможно утверждать, что применение определенных добавок почвенной смеси и правильно подобранные пропорции компонентов смеси приводят к повышению продуктивности растений руколы. Применение конкретных добавок (сапропель) исключается в значимых пропорциях (15 %) и требует отдельного эксперимента при значительных меньших пропорциях. Наилучшие результаты опыта ПВ (Почва + Питательный субстрат) позволяют рекомендовать его как основной при научных исследованиях влияния иных факторов на рост и развитие руколы, но продемонстрировавший сопоставимые с опытом ПВ результаты опыт ПП (Почва + Песок + Питательный субстрат) может быть более выгоден экономически, а также в большей степени подходит под исследования конкретных факторов.

Заключение

В настоящей работе изучалось воздействие различных почвенных смесей и добавок к ним на характеристики роста и развития растений руколы. Результаты показали значительную вариативность, наилучшая продуктивность была достигнута в опыте ПВ – Почва + Питательный субстрат (95:5). Результаты показывают, что выращивание на песке без почвы, даже с учетом добавки питательного субстрата, приводит к пониженным показателям развития растений руколы в сравнении с контролем. Также было установлено, что почвенная смесь в соотношении Почва + Песок + Питательный субстрат 50:45:5 демонстрирует улучшение морфометрических характеристик в сравнении с контролем и сопоставимые показатели продуктивности, что дает возможность утверждать, что смесь почвы и песка в правильно подобранной пропорции может увеличить продуктив-

ность руколы. Также было установлено, что добавка сапропеля приводит к отсутствию развития растений руколы, что, предположительно, может быть связано с повышенной кислотностью почвенных смесей при данной добавке, ухудшением аэрации и изменением микробиологического состава почвы, а также видоспецифичностью отклика растений при применении сапропеля.

Учитывая полученные результаты, можно утверждать, что выращивание руколы на почвенных смесях с ионообменными питательными субстратами обладает рядом конкурентных преимуществ по сравнению с интенсивно развивающимися гидропонными и аэропонными системами. Результаты данной работы могут быть применены в агропромышленности для получения быстрой товарной продукции и научных исследованиях для сокращения сроков экспериментов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nurafiza A. *Theobroma cacao* L. growth performance on organic compost media // *Malaysian Cocoa J.* 2022. Vol. 14. P. 112–116.
2. Чулкова В.В. Особенности использования почвенных смесей при возделывании декоративных растений // *Аграрное образование и наука.* 2021. № 1. С. 2.
3. Euyong M.O., Ofem K.I. Soil Mechanical Composition and Texture as Indices for On-site and Field Precise Choice of Land Use Type to Adopt // *Asian Soil Res. J.* 2020. Vol. 4, N 3. P. 28–43. <https://doi.org/10.9734/asrj/2020/v4i330094>.
4. Устойчивость микробных комплексов почвы к антропогенным факторам среды / под ред. Л.И. Домрачевой, Т.Я. Ашихминой. Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2019. 254 с. DOI: 10.31140/book-2018-05.
5. Добровольский Г.В., Чернов И.Ю. Роль почвы в формировании и сохранении биологического разнообразия. М.: КМК, 2011. 273 с.
6. Rajwar G.S., Kuniyal P.C. Effect of Different Sand and Soil Ratios on the Growth of *Terminalia arjuna* W. & A // *N. Y. Sci. J.* 2010. Vol. 3, N 11. P. 22–26.
7. Konlan S., Opoku-Agyeman M.O., Acheampong K., Opoku-Ameyaw K., Anim-Kwapong G.J., Addo G. Evaluation of River Sand as a Medium for Raising *Cocoa* (*Theobroma cacao* L.) Seedlings // *Am. J. Agric. For.* 2014. Vol. 2, N 4. P. 114–120. DOI: 10.11648/j.ajaf.20140204.13.
8. Rashid K.A., Daran A.B.M., Khalid N., Jalil M., Yusuf Y.M., Rozali S.E., Farzin R. Effects of different quality of soil mixture on growth development of an important medicinal plant, *Boesenbergia rotunda* // *Malays. Appl. Biol.* 2015. Vol. 44, N 3. P. 113–120. URL: <http://journalarticle.ukm.my/10354/> (date of access: 23.05.2024).
9. Jones S.C., Kossakowski J., Gruen S.V. Development of a Sustainable Potting Soil Mix for the NCC Nursery // *Journal of Sustainable Agriculture.* 2019. Vol 1, Issue 1. URL: https://www.mcgill.ca/bits/files/bits/development_of_a_sustainable_potting_soil_mix_final_report.pdf (date of access: 23.05.2024).
10. Косандрович С.Ю., Ионова О.В., Солдатов В.С. Композитные ионитные субстраты на основе полимерного ионита и природного клиноптилолита // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук.* 2017. Т. 4. С. 7–14.
11. Chomczyńska M., Zdeb M. The Effect of Z-ion Zeolite Substrate on Growth of *Zea mays* L. as Energy Crop Growing on Marginal Soil // *J. Ecol. Eng.* 2019. Vol. 20, N 9. P. 253–260. <https://doi.org/10.12911/22998993/112482>.
12. Chomczyńska M., Soldatov V., Wasąg H., Turski M. Effect of ion exchange substrate on grass root development and cohesion of sandy soil // *Int. Agrophys.* 2016. Vol. 30, N 3. P. 293–300. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0095>.
13. Chomczyńska M., Soldatov V., Wasąg H. Effect of different variants of the ion exchange substrate on vegetation of *Dactylis glomerata* L. on the degraded soil // *Proceedings of ECOpole.* 2010. Vol. 4, N 2.
14. Filippova S.V., Eliseeva L.V., Mefodev G.A., Makushev A.A., Shashkarov L.G. Ion-exchange substrates as the basis for growing seedlings of potato in tube culture // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. Vol. 346. 012056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/346/1/012056>.
15. Soldatov V., Pawlowski L., Szymanska M., Chomczyńska M., Matusevich V., Wasąg H., Machon A., Kowalik H., Kobusinski P. Application of ion exchange substrates Biona for fertilization of depleted soils and bare sand // *Ecol. Eng.* 2001. Vol. 18. P. 227–232. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(01\)00070-2](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(01)00070-2).

16. Chomczyńska M., Rycko N. The Application of Z-Ion Substrate to Support Energy Crop Growth (*Dactylis glomerata* L.) on Degraded Soil // *J. Ecol. Eng.* 2021. Vol. 22. P. 106–113. <https://doi.org/10.12911/22998993/137070>.
17. Velazquez-Gonzalez R.S., Garcia-Garcia A.L., Ventura-Zapata E., Barceinas-Sanchez J.D.O., Sosa-Savedra J.C. A Review on Hydroponics and the Technologies Associated for Medium- and Small-Scale Operations // *Agriculture.* 2022. Vol. 12. P. 646. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050646>.
18. Taha M.F., ElMasry G., Gouda M., Zhou L., Liang N., Abdalla A., Rousseau D., Qiu Z. Recent Advances of Smart Systems and Internet of Things (IoT) for Aquaponics Automation: A Comprehensive Overview // *Chemosensors.* 2022. Vol. 10. P. 303. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10080303>.
19. Lakhari I.A., Gao J., Syed T.N., Chandio F.A., Buttar N.A. Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: a review on aeroponics // *J. Plant Interact.* 2018. Vol. 13. P. 338–352. <https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1472308>.
20. Fussy A., Papenbrock J. An overview of soil and soilless cultivation techniques—chances, challenges and the neglected question of sustainability // *Plants.* 2022. Vol. 11, N 9. P. 1153.
21. Buitrago-Villanueva I., Barbosa-Cornelio R., Coy-Barrera E. Influence of the Culture System and Harvest Time on the Specialized Metabolite Composition of Rocket Salad (*Eruca sativa*) Leaves // *Horticulturae.* 2023. Vol. 9, N 2. P. 235.
22. Nakonechnaya O.V., Grishchenko O.V., Khrolenko Y.A., Bulgakov V.P., Burkovskaya E.V., Grigorukh V.P., Prokuda N.A., Kholin A.S., Gafitskaya I.V., Mikheeva A.V., Orlovskaya I.Y., Burdukovskii M.L., Subbotin E.P., Kul'chin Y.N. Effect of LED lighting on morphogenesis and content of ascorbic acid, P, K, and Ca in *Eruca sativa* plants // *Russ. J. Plant Physiol.* 2021. Vol. 68, N 2. P. 356–366. DOI: 10.1134/S1021443721020138.
23. Elmardy N.A., Yousef A.F., Lin K., Zhang X., Ali M.M., Lamlo S.F., Kalaji H.M., Kowalczyk K., Xu Y. Photosynthetic performance of rocket (*Eruca sativa* Mill.) grown under different regimes of light intensity, quality, and photoperiod // *PLoS ONE.* 2021. Vol. 16, N 9. P. e0257745. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257745>.
24. Grantina-Ievina L., Karlsons A., Andersone-Ozola U., Ievinsh G. Effect of freshwater sapropel on plants in respect to its growth affecting activity and cultivable microorganism content // *Zemdirbyste-Agriculture.* 2014. Vol. 101. P. 355–366. DOI: 10.13080/z-a.2014.101.045.
25. Naumova N., Nechaeva T., Smimova N., Fotev Y., Belousova V. Effect of Sapropel Addition on Selected Soil Properties and Field Tomato Yield in South West Siberia // *Asian J. Soil Sci.* 2017. Vol 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.9734/AJSSPN/2017/35760>.
26. Bakšienė E., Janušienė V. The effects of calcareous sapropel application on the changes of Haplic Luvisols chemical properties and crop yield // *Plant Soil Environ.* 2005. Vol. 51. P. 539–544.
27. Brault D., Stewart K.A., Jenni S. Growth, development, and yield of head lettuce cultivated on paper and polyethylene mulch // *Hort. Sci.* 2002. Vol. 37, N 1. P. 92–94.
28. Козловская И.П. Влияние состава субстрата на рост и развитие листового салата при выращивании в зимних теплицах методом проточной гидропонии // Почвы и их эффективное использование: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения доктора сельскохозяйственных наук, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, профессора В.В. Тюлина, Киров, 06–07 февраля 2018 года / гл. ред. В.Г. Мохнаткин. Киров: Вятская государственная сельскохозяйственная академия, 2018. Ч. 1. С. 126–130.
29. Солдатов В.С., Косандрович С.Ю., Ионова О.В. Получение ионообменных субстратов для растений // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук.* 2017. № 1. С. 7–13.

REFERENCES

1. Nurafiza A. *Theobroma cacao* L. Growth Performance on Organic Compost Media. *Malaysian Cocoa Journal.* 2022;14:112–116.
2. Chulkova V.V. Osobennosti ispol'zovaniya pochvennykh smesei pri vozdeleyvanii dekorativnykh rastenii= [Features of the Use of Soil Mixtures the Cultivation of Ornamental Plants]. *Agrarnoe Obrazovanie i Nauka.* 2021;1:2. (In Russ.)
3. Eyong M.O., Ofem K.I. Soil Mechanical Composition and Texture as Indices for On-site and Field Precise Choice of Land Use Type to Adopt. *Asian Soil Resources Journal.* 2020;4(3):28–43. <https://doi.org/10.9734/asrj/2020/v4i330094>.

4. Domracheva L.I., Ashikhmina T.Y. (eds). Ustoichivost' mikrobykh kompleksov pochvy k antropogennym faktoram sredy = [Resistance of Soil Microbial Complexes to Anthropogenic Environmental Factors]. Syktyvkar: IB FRC Komi SC UB RAS; 2019. 254 s. (In Russ.). DOI: 10.31140/book-2018-05.
5. Dobrovolsky G.V., Chernov I.Y. Rol' pochvy v formirovani i sokhraneni biologicheskogo raznobraziya = [The Role of Soil in the Formation and Conservation of Biological Diversity]. Moscow: Tovarshestvo nauchnykh izdani KMK; 2011. 273 s. (In Russ.).
6. Rajwar G.S., Kuniyal P.C. Effect of Different Sand and Soil Ratios on the Growth of *Terminalia arjuna* W. & A. *New York Science Journal*. 2010;3(11):22–26.
7. Konlan S., Opoku-Agyeman M.O., Acheampong K., Opoku-Ameyaw K., Anim-Kwapong G.J., Addo G. Evaluation of River Sand as a Medium for Raising Cocoa (*Theobroma cacao* L.) Seedlings. *American Journal of Agricultural Economics*. 2014;2(4):114–120. DOI: 10.11648/j.ajaf.20140204.13.
8. Rashid K.A., Daran A.B.M., Khalid N., Jalil M., Yusuf Y.M., Rozali S.E., Farzin R. Effects of different quality of soil mixture on growth development of an important medicinal plant, *Boesenbergia rotunda*. *Malaysian Applied Biology*. 2015;44(3):113–120. URL: <http://journalarticle.ukm.my/10354/> (date of access: 23.05.2024).
9. Jones S.C., Kossakowski J., Gruen S.V. Development of a Sustainable Potting Soil Mix for the NCC Nursery. *Journal of Sustainable Agriculture*. 2019;1(1). URL: https://www.mcgill.ca/bits/files/bits/development_of_a_sustainable_potting_soil_mix_final_report.pdf (date of access: 23.05.2024).
10. Kasandrovich S.Y., Ionova O.V., Soldatov V.S. Kompozitnye ionitnye substraty na osnove polimernogo ionita i prirodnogo klinoptilolita = [Composite Ion Exchange Substrates Based on Polymeric Ion Exchanger and Natural Clinoptilolite]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical series*. 2017;4:7–14. (In Russ.). URL: https://vestichem.belnauka.by/jour/article/view/282?locale=en_US (date of access: 23.05.2024).
11. Chomczyńska M., Zdeb M. The Effect of Z-ion Zeolite Substrate on Growth of *Zea mays* L. as Energy Crop Growing on Marginal Soil. *Journal of Ecological Engineering*. 2019;20(9):253–260. <https://doi.org/10.12911/22998993/112482>.
12. Chomczyńska M., Soldatov V., Wasąg H., Turski M. Effect of ion exchange substrate on grass root development and cohesion of sandy soil. *International Agrophysics*. 2016;30(3):293–300. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0095>.
13. Chomczyńska M., Soldatov V., Wasąg H. Effect of different variants of the ion exchange substrate on vegetation of *Dactylis glomerata* L. on the degraded soil. *Proceedings of ECOPole*. 2010;4(2).
14. Filippova S.V., Eliseeva L.V., Mefodev G.A., Makushev A.A., Shashkarov L.G. Ion-exchange substrates as the basis for growing seedlings of potato in tube culture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;346. 012056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/346/1/012056>.
15. Soldatov V., Pawlowski L., Szymanska M., Chomczyńska M., Matusевич V., Wasąg H., Machon A., Kowalik H., Kobusinski P. Application of ion exchange substrates Biona for fertilization of depleted soils and bare sand. *Ecological Engineering*. 2001;18:227–232. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(01\)00070-2](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(01)00070-2).
16. Chomczyńska M., Ryccko N. The Application of Z-Ion Substrate to Support Energy Crop Growth (*Dactylis glomerata* L.) on Degraded Soil. *Journal of Ecological Engineering*. 2021;22:106–113. <https://doi.org/10.12911/22998993/137070>.
17. Velazquez-Gonzalez R.S., Garcia-Garcia A.L., Ventura-Zapata E., Barceinas-Sanchez J.D.O., Sosa-Savedra J.C. A Review on Hydroponics and the Technologies Associated for Medium- and Small-Scale Operations. *Agriculture*. 2022;12:646. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050646>.
18. Taha M.F., ElMasry G., Gouda M., Zhou L., Liang N., Abdalla A., Rousseau D., Qiu Z. Recent Advances of Smart Systems and Internet of Things (IoT) for Aquaponics Automation: A Comprehensive Overview. *Chemosensors*. 2022;10:303. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10080303>.
19. Lakhari I.A., Gao J., Syed T.N., Chandio F.A., Buttar N.A. Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: a review on aeroponics. *Journal of Plant Interactions*. 2018;13:338–352. <https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1472308>.
20. Fussy A., Papenbrock J. An overview of soil and soilless cultivation techniques-chances, challenges and the neglected question of sustainability. *Plants*. 2022;11(9):1153.
21. Buitrago-Villanueva I., Barbosa-Cornelio R., Coy-Barrera E. Influence of the Culture System and Harvest Time on the Specialized Metabolite Composition of Rocket Salad (*Eruca sativa*) Leaves. *Horticulturae*. 2023;9(2):235.
22. Nakonechnaya O.V., Grishchenko O.V., Khrolenko Y.A., Bulgakov V.P., Burkovskaya E.V., Grigor-chuk V.P., Prokuda N.A., Kholin A.S., Gafitskaya I.V., Mikheeva A.V., Orlovskaya I.Y., Burdukovskii M.L.,

Subbotin E.P., Kul'chin Y.N. Effect of LED lighting on morphogenesis and content of ascorbic acid, P, K, and Ca in *Eruca sativa* plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2021;68(2):356–366.

DOI: 10.1134/S1021443721020138.

23. Elmardy N.A., Yousef A.F., Lin K., Zhang X., Ali M.M., Lamlo S.F., Kalaji H.M., Kowalczyk K., Xu Y. Photosynthetic performance of rocket (*Eruca sativa* Mill.) grown under different regimes of light intensity, quality, and photoperiod. *PLoS ONE*. 2021;16(9):e0257745.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257745>.

24. Grantina-Ievina L., Karlsons A., Andersone-Ozola U., Ievinsh G. Effect of freshwater sapropel on plants in respect to its growth affecting activity and cultivable microorganism content. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2014;101:355–366. DOI: 10.13080/z-a.2014.101.045.

25. Naumova N., Nechaeva T., Smirnova N., Fotev Y., Belousova V. Effect of Sapropel Addition on Selected Soil Properties and Field Tomato Yield in South West Siberia. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2017;1:1–11. <https://doi.org/10.9734/AJSSPN/2017/35760>.

26. Bakšienė E., Janušienė V. The effects of calcareous sapropel application on the changes of Haplic Luvisols chemical properties and crop yield. *Plant, Soil and Environment*. 2005;51:539–544.

27. Brault D., Stewart K.A., Jenni S. Growth, development, and yield of head lettuce cultivated on paper and polyethylene mulch. *Hort Science*. 2002;37(1):92–94.

28. Kozlovskaya I.P. Vliyaniye sostava substrata na rost i razvitiye listovogo salata pri vyrashchivanii v zimnikh teplitsakh metodom protochnoi gidroponiki = [The influence of the composition of the substrate on the growth and development of lettuce when grown in winter greenhouses using flow hydroponics]. In: *Pochvy i ikh ehffektivnoe ispol'zovanie: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 90-letiyu so dnya rozhdeniya doktora sel'skokhozyaistvennykh nauk, zasluzhennogo deyatelya nauki Rossiiskoi Federatsii, professora V.V. Tyulina, Kirov, 06–07 fevralya 2018 goda. Chast' 1*. Kirov: Vyatskaya Gosudarstvennaya Sel'skokhozyaistvennaya Akademiya; 2018. S. 126–130. (In Russ.).

29. Soldatov V.S., Kosandrovich S.Y., Ionova O.V. Poluchenie ionoobmennyykh substratov dlya rastenii = [Preparation of Ion Exchange Substrates for Plants]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical series*. 2017;1:7–13. (In Russ.). URL: https://vestichem.belnauka.by/jour/article/view/232?locale=en_US. (date of access: 23.05.2024).