

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО FORESTRY

Научная статья

УДК 630*232.422

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.6>

EDN: QBEZNM

Обеззараживание субстратов при выращивании семян древесных пород в контейнерах

Д. И. Мухортов[✉], М. А. Окач, Н. Д. Майоров

Поволжский государственный технологический университет,

Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

MuhortovDI@volgatech.net[✉]

Аннотация. *Введение.* Получение стандартного лесного посадочного материала с закрытой корневой системой предполагает использование при его выращивании качественного тепличного субстрата, который характеризуется оптимальными физико-химическими свойствами, отсутствием семян сорной растительности и патогенной микрофлоры. В качестве альтернативного способа обеззараживания предлагается использовать электромагнитные поля сверхвысокой частоты. *Цель работы* – определить эффективный режим обеззараживания корнезакрывающего субстрата в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ). *Объектом* исследования был низинный торф с включёнными в его состав семенами сорных растений. В ходе эксперимента был проведён количественный анализ колониеобразующих единиц микроорганизмов в торфе, изучены всхожесть семян сорной растительности и биометрические параметры семян сосны обыкновенной и ели европейской. Проанализировано воздействие СВЧ-излучения на изменение температуры и массы торфа. *Результаты.* Анализ изменения температуры нагрева торфа от режима СВЧ-излучения показал, что интенсивность нагрева торфа зависит от мощности излучения и временной экспозиции. Эффективные температуры разогрева в 100–120 °С отмечались при мощностях 600–800 Вт с длительностью обработки в диапазоне 8–10 минут, а также при 450 Вт с десятиминутным облучением. Минимальные потери массы торфа под воздействием СВЧ-излучения наблюдались при режимах мощности от 300–450 Вт при экспозиции 10 минут. Изучение воздействия СВЧ-полей на микроорганизмы выявило подавляющее и стимулирующее действие излучения при различных режимах обработки. Анализ результатов эксперимента по влиянию режимов СВЧ-излучения на всхожесть семян сорных растений показал полное отсутствие всходов при режиме мощности излучения 200–450 Вт и продолжительности воздействия СВЧ от 4–8 минут. У семян сосны обыкновенной, выращенных на торфе после обеззараживания СВЧ-излучением, отмечалось увеличение массы семян по сравнению с контролем. У семян ели европейской снижалась энергия прорастания семян и достоверно повышался показатель диаметра стволиков у корневой шейки. *Выводы.* Оптимальным режимом стерилизации торфа СВЧ-излучением являлась мощность 300 Вт и временная экспозиция облучения – 10 минут. Определены режимы СВЧ-излучения, ингибирующие прорастание семян. Обеззараживание торфа СВЧ-излучением положительно влияет на массу семян сосны обыкновенной и снижает процент энергии прорастания семян ели европейской.

Ключевые слова: лесопосадочный материал; корнезакрывающий субстрат; электромагнитное поле сверхвысокой частоты; эффективная температура разогрева; микроорганизмы; семена сорной растительности

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Мухортов Д. И., Окач М. А., Майоров Н. Д. Обеззараживание субстратов при выращивании семян древесных пород в контейнерах // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 2 (62). С. 6–19. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.6>; EDN: QBEZNM

© Мухортов Д. И., Окач М. А., Майоров Н. Д., 2024

Введение

В настоящее время в лесном хозяйстве Российской Федерации значительно возрос интерес к выращиванию сеянцев с закрытой корневой системой. Важным фактором, определяющим биометрические параметры растений в условиях ограниченного объёма корнезакрывающего субстрата, является его качество [1]. Традиционно основой субстратов для выращивания растений в контейнерах является торф, модифицированный комплексом минеральных добавок, смачивателей и разрыхлителей. Субстраты, предназначенные для выращивания растений в условиях закрытого грунта, должны обладать определёнными агрофизическими, агрохимическими и биологическими показателями. К биологическим свойствам корнезакрывающих субстратов относят отсутствие патогенных микроорганизмов [2] и семян сорной растительности [3]. В условиях контролируемого микроклимата необходимо уделять особое внимание биологическим свойствам субстратов, это поможет снизить экономические затраты на уход и предотвратить потери сеянцев от инфекционных заболеваний. В настоящее время распространёнными способами дезинфекции корнезакрывающих субстратов является обработка водяным паром и высокими температурами [4]. Энергетически и технически данные способы обеззараживания затратные, в связи с чем в качестве альтернативы предлагается использовать потоки электромагнитной энергии сверхвысокой частоты (СВЧ). Отмечено, что дезинфицирующий эффект СВЧ-излучения связан с тепловыми [5] и электрическими явлениями [6–9]. Согласно литературным данным, СВЧ-излучения эффективны при инактивации патогенных микроорганизмов в пищевых продуктах [10], медицинских отходах [11–13], отходах животноводства [14], почве [15]. Учёные отмечают зависимость летального воздействия СВЧ-излучения на микроорганизмы от влажности, теплопроводности, диэлектрической

проводимости субстрата, в котором они находятся. Исследование влияния микроволновых полей на семена сорной растительности выявили два механизма воздействия: стимулирующее [3, 16] и подавляющее [3, 17, 18]. Известно, что эффективная критическая температура для жизни патогенных организмов находится в диапазоне 40–120 °С. В зависимости от таксономического положения и физиологического состояния летальными температурами для микроорганизмов являются 100–120 °С [19]. В диапазоне температур 40–70 °С погибают нематоды и яйца гельминтов [14, 20–22], семена сорных растений теряют всхожесть при температурах близких к 100 °С [3].

Приоритетным направлением в изучении действия СВЧ-излучения при обеззараживании корнезакрывающих субстратов является определение оптимальной временной экспозиции, мощности излучения и частоты волны.

Цель работы – определить эффективный режим обеззараживания корнезакрывающего субстрата в электромагнитном поле сверхвысокой частоты.

Задачи:

- 1) изучить зависимость изменения температуры нагрева торфа и его массы от мощности и временной экспозиции СВЧ-излучения;
- 2) проанализировать воздействие электромагнитного поля СВЧ на жизнеспособность микроорганизмов и всхожесть семян сорной растительности в изучаемом субстрате;
- 3) изучить влияние обеззараженного СВЧ-излучением субстрата на рост и развитие тест-объектов.

Материалы и методы исследования

Работа проходила в два этапа. Первый этап проводился в лабораториях Поволжского государственного технологического университета (ПГТУ) «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Центра коллективного пользования («ЭБЭЭ» ЦКП) и «Микробиологии». Второй этап прохо-

дил в малом тепличном комплексе на территории Ботанического сада-института ПГТУ. В работе использовался низинный торф «Альцевского торфопредприятия» с массовой долей воды 18 %, кислотностью ($pH_{КС1}$) 5,3 и общей плотностью 0,324 г/см³.

На лабораторном этапе эксперимента в образцы торфа массой 190 г вносили семена сорной растительности в количестве 100 штук каждого вида. Данная навеска для дальнейшего облучения помещалась в пластиковый контейнер, толщина слоя, обрабатываемого СВЧ-излучением, составляла 3 см. В исследовании использовали семена травянистых и древесных сорных растений:

Echinochloa crus-galli (L.) Beauv. (ежовник обыкновенный) – однолетнее травянистое растение семейства Poaceae, класса Liliopsida;

Chenopodium album L. (марь белая) – однолетнее травянистое растение семейства Chenopodiaceae, класса Magnoliopsida;

Betula pendula Roth (берёза повислая) – древесное растение семейства Betulaceae, класса Magnoliopsida.

В качестве источника электромагнитного поля СВЧ использовался бытовой магнетрон с регулируемым уровнем выходной мощности и частотой излучения 2 450 МГц. В работе было проанализировано воздействие СВЧ-излучения при мощностях 100; 200; 300; 450; 600; 700; 800 Вт. Каждый режим мощности испытывался в следующих временных экспозициях: 0,5; 1; 2; 4; 6; 8; 10 мин. Контролем был торф без обработки СВЧ-излучением.

Изучение динамики температуры торфа при облучении проводили с использованием цифрового термометра REXANT RX-512. Для оценки изменения массы торфа производили взвешивание образцов до и после воздействия СВЧ-облучения.

Влияние ЭМП СВЧ на численность микроорганизмов в торфе оценивали методом подсчёта колониеобразующих единиц (КОЕ) [23].

Действие СВЧ-излучения на семена сорной растительности в составе воздушно-сухой навески торфа проводили с помощью учёта всхожести семян согласно ГОСТ 13056.6-97 «Межгосударственный стандарт. Семена деревьев и кустарников. Метод определения всхожести» и ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести».

На втором этапе исследований оценивалось влияние торфа, прошедшего обеззараживание СВЧ-излучением, на рост и развитие сеянцев ели европейской (*Picea abies* (L.) H.Karst.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Семена сосны обыкновенной и ели европейской перед экспериментом прошли стратификацию и предпосевную обработку фунгицидами и были посеяны 27.05.2022 года в контейнеры «Plantek 81F» с объёмом ячейки 85 см³. В конце вегетационного периода фиксировали биометрические и весовые показатели сеянцев, а также рассчитывали сохранность сеянцев относительно количества всходов. В условиях закрытого грунта в исследуемом торфе изучался видовой состав сорной растительности и динамика всхожести семян сорных растений. В качестве контроля на втором этапе исследований использовали торф без воздействия СВЧ-излучения и торф после обеззараживания паром под давлением в автоклаве.

Материалы исследования обработаны методами описательной статистики, регрессионного и дисперсионного анализа с использованием прикладной программы Statistika 6 и Microsoft Excel на уровне надёжности 95 %.

Результаты и обсуждение

Для изучения зависимости изменения температуры нагрева торфа от режима СВЧ-излучения был проведён регрессионный анализ. Анализ показал, что интенсивность нагрева торфа зависит от мощности излучения и временной экспозиции. Динамика зависимости описывается функцией $y = a \cdot (1 - \exp(-c \cdot (x)^b)) + m$. Эффектив-

ные температуры разогрева в 100–120 °С отмечались при мощностях 600–800 Вт с длительностью обработки в диапазоне 8–10 минут, а также при 450 Вт с десятиминутным облучением (рис. 1). Температуры, близкие к эффективным (90–100 °С), фиксировались во всех режимах мощности, при этом минимальному

значению мощности соответствовала длительная временная экспозиция. Выявлено, что максимальная скорость разогрева торфа происходит в первые 30 секунд от начала облучения, независимо от режима мощности. Скорость разогрева торфа стабилизируется после 6 минуты нагрева.

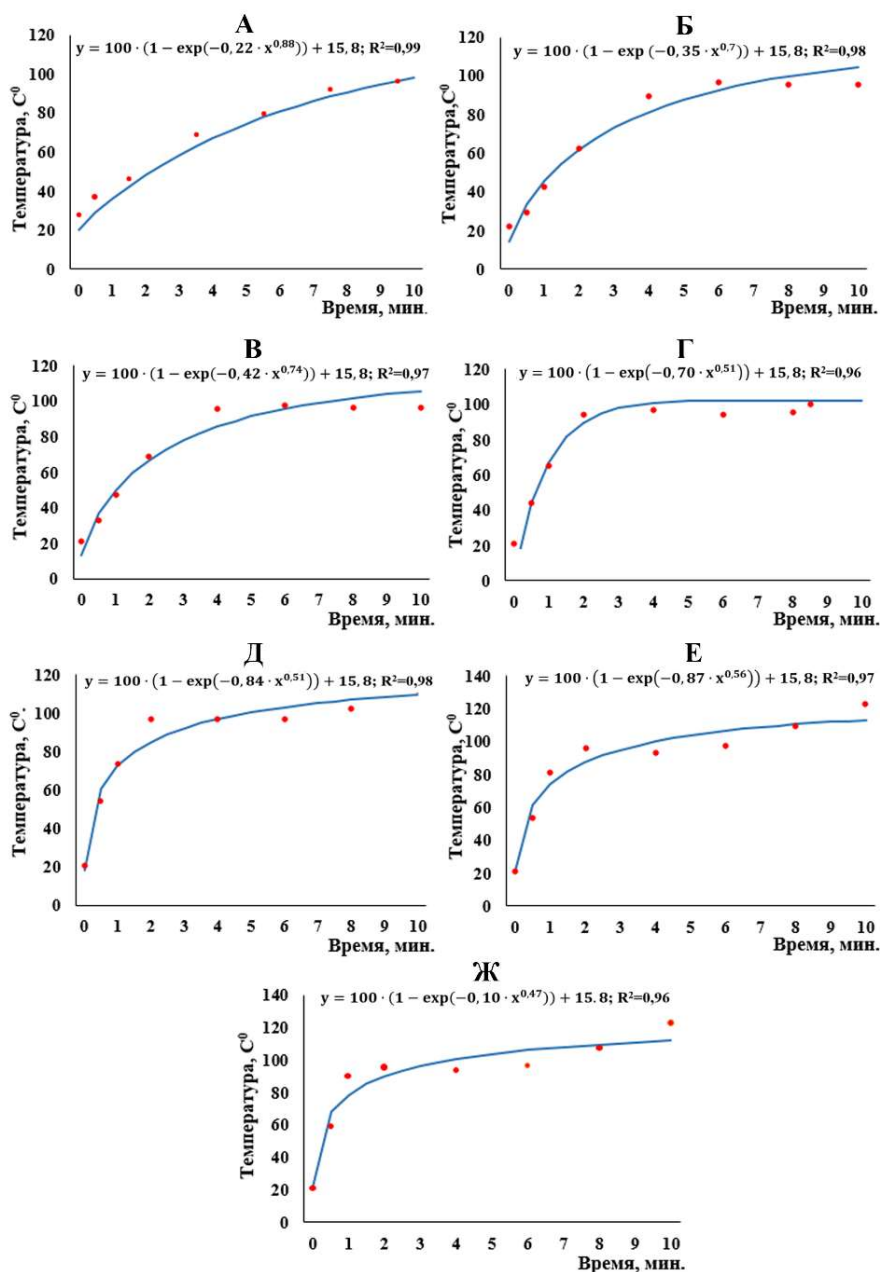


Рис. 1. Зависимость температуры нагрева торфа от мощности СВЧ-излучения и продолжительности облучения (А – мощность 100 Вт, Б – мощность 200 Вт, В – мощность 300 Вт, Г – мощность 450 Вт, Д – мощность 600 Вт, Е – мощность 700 Вт, Ж – мощность 800 Вт)

Fig. 1. Dependence of the peat heating temperature on the power and duration of microwave irradiation (A – power of 100 W, B – power of 200 W, C – power of 300 W, D – power of 450 W, E – power of 600 W, F – power of 700 W, G – power of 800 W)

Разогрев торфа в ЭМП СВЧ связан с присутствием в его составе дипольных молекул воды. Под действием СВЧ-поля происходит переориентация дипольных молекул воды за счёт колебательных и вращательных движений. В переменном электрическом поле молекулы воды находятся в постоянном движении. Эти движения приводят к возникновению между дипольными молекулами силы трения, в результате чего выделяется тепло [5]. Чем больше молекул воды находится в торфе, тем больше выделяется тепловой энергии. В процессе образования тепловой энергии происходит испарение воды. Важным агрофизическим параметром корнезакрывающих субстратов является содержание доступной для растений воды. В связи с чем был проведён регрессионный анализ, который позволил выявить зависимость

изменения массы торфа от мощности СВЧ-излучения и времени его воздействия. Установлено, что интенсивность снижения массы торфа в процессе СВЧ-обеззараживания описывается функцией $y = a \cdot (1 - \exp(-c \cdot x^b))$, где x – разница между первоначальной массой образца торфа и его массой после обработки СВЧ-излучением. Выявленные закономерности показывают, что минимальные потери массы наблюдаются при режимах мощности от 300–450 Вт при экспозиции 10 минут, при этом соблюдается необходимый для обеззараживания температурный режим (рис. 2). Проведённый анализ потребления электроэнергии в изучаемых режимах СВЧ-обеззараживания показал минимальные затраты энергии при обеззараживании в течение 10 минут при мощности СВЧ-излучения 300 Вт.

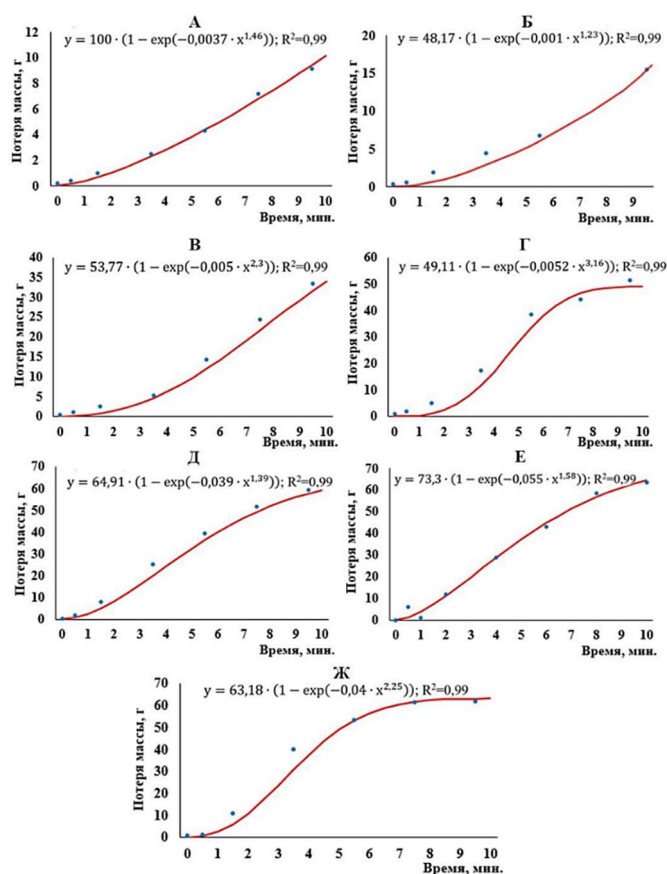


Рис. 2. Зависимость потери массы торфа от мощности излучения и продолжительности обработки (А – мощность 100 Вт, Б – мощность 200 Вт, В – мощность 300 Вт, Г – мощность 450 Вт, Д – мощность 600 Вт, Е – мощность 700 Вт, Ж – мощность 800 Вт)

Fig. 2. Dependence of the peat mass loss on the power and duration of the microwave radiation treatment (A – power of 100 W, B – power of 200 W, C – power of 300 W, D – power of 450 W, E – power of 600 W, F – power of 700 W, G – power of 800 W)

Результаты исследования зависимости температуры разогрева торфа от потери массы при СВЧ-излучении показали, что максимальное количество молекул воды подвергается воздействию СВЧ-энергии в первые минуты. Количество вовлечённых в движение молекул зависит от мощности излучения. Постепенно скорость повышения температуры торфа падает, при этом потери воды повышаются, следовательно, спад скорости нагрева связан со снижением в торфе количества основного поглотителя СВЧ-излучения (воды), в связи с чем целесообразно продолжить эксперименты по СВЧ-обеззараживанию торфа с разными долями воды в его составе.

Изучение воздействия СВЧ-полей на бактерии и микроскопические грибы (рис. 3) выявило подавляющее и стимулирующее действие излучения. Эффективное подавление микроорганизмов отмечалось при мощности излучения в диапазоне 300–450 Вт и временной экспозиции для грибов 6–10 минут, для бактерий – 8–10 минут.

Отсутствие жизнеспособных микроорганизмов в торфе отмечалось при режимах облучения мощностью 600 Вт (8–10 минут) и 700–800 Вт (4–10 минут). Среди эффективных режимов обработки наименьшие затраты электроэнергии отмечались при десятиминутном облучении мощностью 300 Вт. Для этого режима была характерна минимальная потеря воды (18,6 %). Излучение мощностью 300 Вт

стимулировало размножение грибов, при временной экспозиции облучения 2–4 минуты, а бактерий при воздействии СВЧ-поля в течение 2–6 минут. Активация процесса размножения у грибов наблюдалась при одноминутном воздействии СВЧ-излучения мощностью 600 Вт и в течение двух минут при мощности 700 Вт. Увеличение численности КОЕ микроорганизмов в торфе, при воздействии СВЧ-излучений, может быть связано с активацией прорастания спор, находящихся в состоянии покоя.

Оценка взаимосвязи количества колониеобразующих единиц микроорганизмов при различных режимах стерилизации торфа СВЧ-излучением и потери массовой доли воды, связанной с воздействием СВЧ, показала наличие умеренных и сильных корреляционных связей (табл. 1). При повышении мощности СВЧ-излучения увеличивается потеря воды в торфе и снижается число КОЕ микроорганизмов. Наибольшее влияние на снижение численности микроорганизмов оказывали мощности излучения в диапазоне 400...800 Вт (-0,70...-0,82).

Анализ результатов эксперимента по влиянию режимов СВЧ-излучения на всхожесть семян сорных растений в лабораторных условиях показал низкий процент всхожести семян *Betula pendula* Roth (1,4 %) и *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv (8,5 %) (рис. 4).

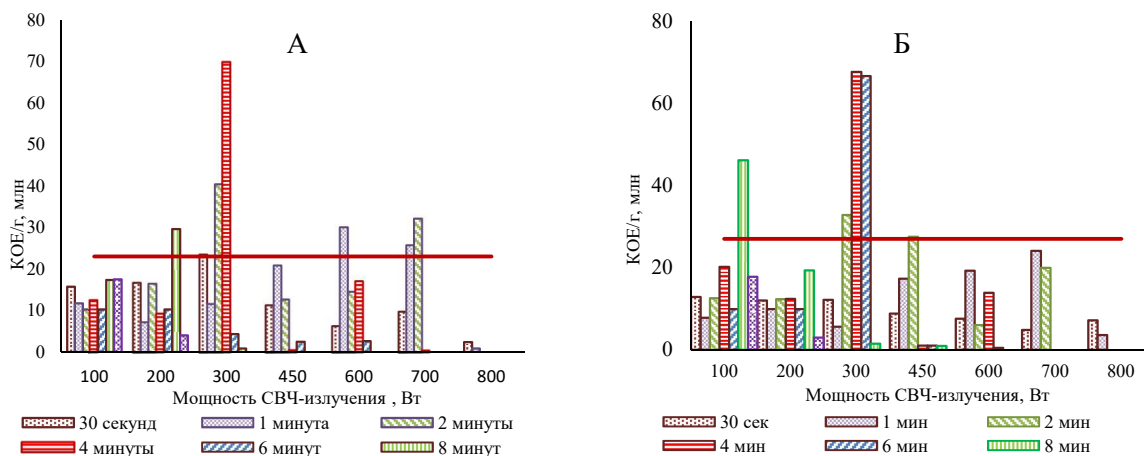


Рис. 3. Количественный анализ микроскопических грибов (А) и бактерий (Б) в торфе после обработки СВЧ-излучением

Fig. 3. Quantitative analysis of microscopic fungi (A) and bacteria (B) in peat after microwave radiation treatment

Таблица 1. Коэффициенты корреляции при оценке взаимосвязи количества КОЕ микроорганизмов и массовой доли потери воды в торфе при СВЧ-облучении

Table 1. Correlation coefficients for estimating the relationship between the number of CFUs of microorganisms and the mass fraction of water loss in peat during microwave irradiation

Микроорганизмы	Мощность СВЧ-излучения						
	100 Вт	200 Вт	300 Вт	450 Вт	600 Вт	700 Вт	800 Вт
Бактерии	0,57	0,07	-0,31	-0,73	-0,73	-0,75	-0,72
Грибы	0,62	0,31	-0,58	-0,82	-0,72	-0,76	-0,70

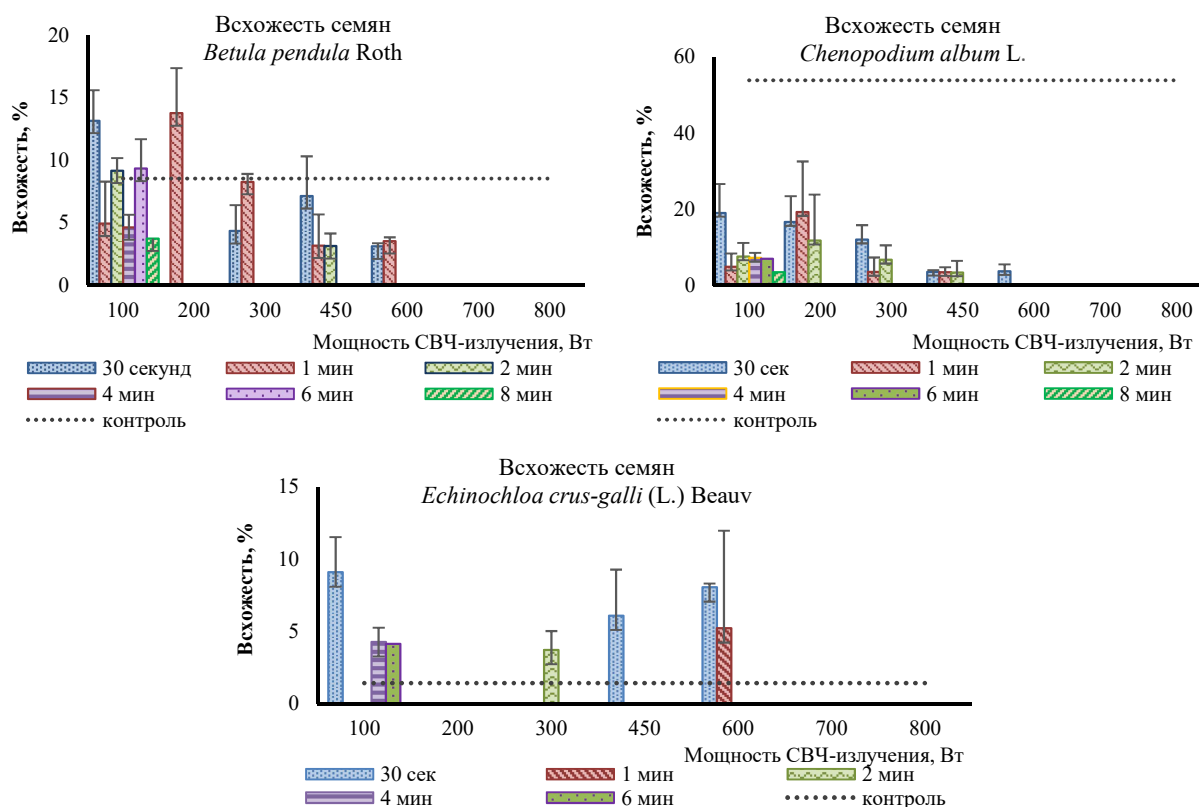


Рис. 4. Всхожесть семян сорных растений в зависимости от режимов облучения

Fig. 4. Germination capacity of weed seeds depending on irradiation modes

Всхожесть семян *Chenopodium album* L. составила 54 %. Ингибирующее действие исследуемых режимов ЭМИ СВЧ относительно контрольной группы наблюдалось у мари белой. Полное отсутствие всходов отмечалось при мощности излучения в диапазоне 200–450 Вт и продолжительности воздействия СВЧ от 4–8 минут, а также при 600 Вт (1–8 минут), 700 и 800 Вт. Для семян берёзы повислой были отмечены режимы, стимулирующие прорастание семян: при мощности 100 Вт и временной экспозиции 30 сек., 2 мин., 6 мин.; при 200 Вт – 1 мин.; при 700 Вт – 30 сек., 1 мин.; 800 Вт – 30 сек. Потеря всхожести семян берёзы наблюдалась при мощности

СВЧ-излучения 300; 600; 700; 800 Вт, начиная с двух минут воздействия. Режимы обработки мощностью 100 Вт (30 сек., 4–6 мин.), 300 Вт (2 мин.), 450 Вт (30 сек.), 600 Вт (30–60 сек.) повышали естественную всхожесть семян ежовника обыкновенного. В остальных режимах прорастание семян не наблюдалось. Анализ стимулирующих режимов СВЧ-обработки для семян сорных растений выявил эффективные температуры для прорастания семян берёзы и ежовника, они находились в диапазоне 28–80 °C. Таким образом, минимальным эффективным режимом СВЧ-облучения также можно считать 300 Вт при десятиминутной экспозиции.

Второй этап исследований влияния СВЧ-излучения на всхожесть семян сорной растительности проходил в теплице арочного типа с поликарбонатным покрытием и автоматической системой полива. На этом этапе изучалась засорённость исследованного торфа семенами сорной растительности и динамика всхожести сорных семян. В эксперименте использовали торф, обработанный при мощности СВЧ-излучения 800 Вт продолжительностью 6 мин.; торф, обработанный в автоклаве при режиме +120 °С, давление 1,1 атмосфер, длительностью 60 мин., в качестве контроля использовали торф, не подвергшийся обеззараживанию. Видовой состав, количество проросших семян сорных растений и плотность засорённости торфа при разных способах обеззараживания представлен на рис. 5. Анализ видового состава сорных растений выявил пять видов: крестовник обыкновенный (*Senecio vulgaris* L.), берёза повислая (*Betula pendula* Roth), ежовник обыкновенный (*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv), марь белая (*Chenopodium album* L.), горец почечуйный (*Persicaria maculosa* S.F. Gray). Первые всходы сорной растительности в контейнерах с посевами сосны обыкновенной и ели европейской появились на 15 день, наблюдения за всходами сорной растительности продолжались в течение 22 дней.

Плотность засорённости торфа жизнеспособными семенами сорных растений до обеззараживания составляла 0,68 шт/см³,

после воздействия СВЧ-излучения показатели засорённости снизились до 0,46 шт/см³, обработка торфа автоклавом стимулировала прорастание сорных семян, количество жизнеспособных семян со всходами увеличилось до 1,14 шт/см³.

Видовой состав прорастающих семян сорной растительности после обеззараживания СВЧ-излучением сократился до *S. vulgaris* (85 %) и *C. album* (15 %). Автоклавирование стимулировало ростовые процессы семян *B. pendula* (19 %), ранее не прораставших в контрольных образцах. Семена *S. vulgaris* (72 %) и *C. album* (9 %) также давали жизнеспособные всходы. Таким образом, применение СВЧ-излучения эффективно снижает плотность жизнеспособных семян сорной растительности в торфе.

Пик гибели сеянцев сосны и ели от инфекционных болезней приходился на 35 день после посева. Количественная оценка погибших от инфекции сеянцев сосны и ели (рис. 6) показала, что обеззараживание ЭМП СВЧ снижает процент гибели от инфекционных заболеваний сеянцев сосны почти в 4 раза. В торфе, после автоклавирования, сократилось количество инфицированных сеянцев сосны в 9 раз. Существенных различий потери сеянцев ели от инфекционных заболеваний не установлено.

На втором этапе исследований проводилась оценка влияния торфа, обеззараженного СВЧ-излучением, на биометрические параметры сеянцев (табл. 2, 3).

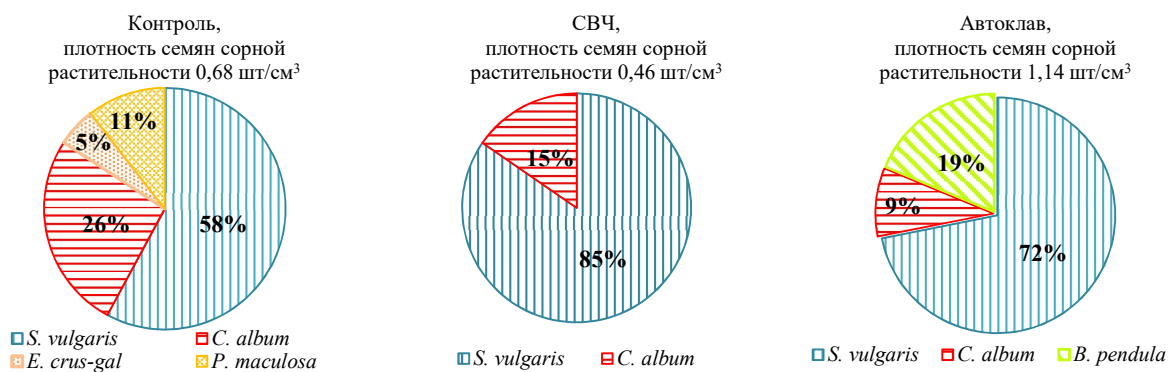


Рис. 5. Видовой состав сорной растительности в торфе
Fig. 5. Species composition of the weed vegetation in peat

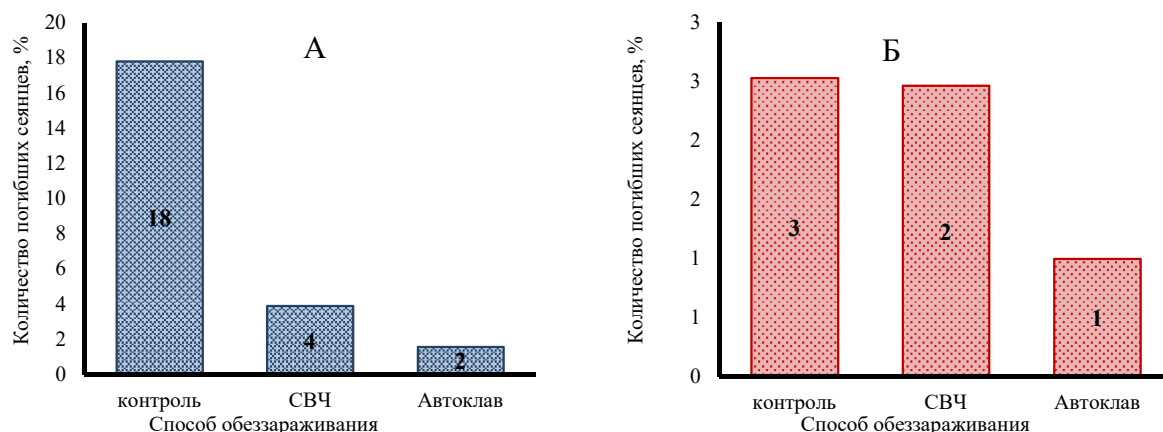
Рис. 6. Количество сеянцев, погибших от инфекционных заболеваний: А – *P. sylvestri*, Б – *P. abies*Fig. 6. Number of seedlings that died from infectious diseases: A – *P. sylvestris*, B – *P. abies***Таблица 2. Посевные качества семян, биометрические и весовые показатели сеянцев сосны обыкновенной, выращенной на торфе с разными вариантами обеззараживания**

Table 2. The sowing qualities of seeds and the biometric and weight indicators of seedlings of Scots pine trees that were grown on peat subjected to different disinfection options

Вариант обеззараживания	Высота стволика, см	Длина корня, см	Диаметр корневой шейки, мм	Всхожесть, %	Энергия прорастания, %	Сохранность, %	Масса 100 растений, г	
							надземной части	корней
Контроль	5,1±0,11	10,6±0,39	1,0±0,02	51,0	28,8	78,3	13,2±1,08	6,3±0,23
СВЧ	6,1±0,17	10,5±0,34	1,1±0,03	72,4	34,6	92,6	19,9±1,68	8,9±0,67
Автоклав	6,0±0,15	9,3±0,34	1,0±0,03	57,6	58,0	94,5	16,2±0,59	7,4±0,53
НСР ₀₅	*	*	*	*	*	*	3,1	1,8
F _{расч.}	3,3	0,6	0,2	2,2	4,9	1,1	8,8	6,2
F _{табл.}	5,1							
Доля влияния фактора, %	52,3	16,8	5,2	41,8	62,2	26,1	75,0	67,3

Примечание: * – различие на 5 % уровне значимости не существенно ($F_{расч.} < F_{табл.}$).**Таблица 3. Биометрические показатели и посевные качества семян ели европейской, выращенной на торфе с разными вариантами обеззараживания**

Table 3. The biometric indicators and the sowing qualities of seeds of Norway spruce trees grown on peat subjected to different disinfection options

Вариант обеззараживания	Высота стволика, см	Диаметр стволика у корневой шейки, мм	Кол-во боковых побегов, шт.	Всхожесть, %	Энергия прорастания, %	Сохранность, %
Контроль	2,1±0,09	0,7±0,03	1,2±0,03	42,8	18,1	87,7
СВЧ	3,2±0,87	1,1±0,02	1,2±0,09	31,3	5,3	88,2
Автоклав	3,8±0,10	0,9±0,09	1,2±0,02	60,9	30,9	92,6
НСР ₀₅	*	0,26	*	*	16,61	21,7
F _{расч.}	1,54	5,99	0,51	2,26	7,08	0,19
F _{табл.}	5,14					
Доля влияния фактора, %	33,9	66,6	16,9	42,9	70,3	58,9

Примечание: * – различие на 5% уровне значимости не существенно ($F_{расч.} < F_{табл.}$).

Дисперсионный анализ не показал достоверных различий между линейными показателями сеянцев и посевными качествами семян, выращенных на субстратах с разными способами обеззараживания. Зато средние показатели массы надземной части и массы корневой системы сеянцев сосны, выращенных на торфе, обработанном ЭМП СВЧ, достоверно были выше, чем в контрольном варианте и при обеззараживании паром в автоклаве.

Дисперсионный анализ биометрических показателей сеянцев ели европейской (табл. 3), выращенных на торфе с разными вариантами обеззараживания, выявил достоверно высокие показатели диаметра стволиков у корневой шейки в варианте обеззараживания СВЧ-излучением ($F_{\text{расч.}}=5,99 > F_{\text{табл.}}=5,14$). Энергия прорастания семян в варианте с СВЧ-обработкой торфа была достоверно ниже по сравнению с контролем и обработкой в автоклаве.

Выводы

1. Эффективные режимы обеззараживания торфа в электромагнитном поле сверхвысокой частоты, при которых температура разогрева торфа приближалась к 100 °С, достигались при мощности излучения 700–800 Вт и продолжительности облучения 10 мин.

2. Оптимальным режимом стерилизации торфа СВЧ-излучением являлась мощность 300 Вт и временная экспозиция облучения 10 мин.

3. Определены режимы СВЧ-излучения, ингибирующие и стимулирующие прорастание часто встречаемых в торфе семян сорных растений. Полученные данные могут быть использованы при подборе стратегии борьбы с сорной растительностью.

4. Обеззараживание торфа СВЧ-излучением не влияло на линейные параметры сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской. Положительное влияние обеззараживания торфа СВЧ-излучением отмечалось на биомассу сеянцев *P. sylvestris* и диаметр стволиков у корневой шейки сеянцев *P. abies*.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бобушкина С. В., Сеньков А. О., Файзулин Д. Х. Практика выращивания лесного посадочного материала с закрытой корневой системой применительно к тепличным комплексам Архангельской области // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3, № 4. С. 1–16. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-16; EDN: DRMUYP

2. Чернаков В. В. Распространение и вредность бактериальных болезней лесных пород в России // Защита и карантин растений. 2015. № 11. С. 19–21. EDN: UMSPNL

3. Толчин А. Э., Мухомтов Д. И., Дрошнев О. Н. Закономерности снижения всхожести семян сорных растений в корнезакрывающих субстратах при СВЧ-облучении // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая. 2015. № 3. С. 54–59. EDN: UIZIYJ

4. Баранов Л. А., Бурнаев М. Г. Устройство для электротермической обработки почвы защищенного грунта // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2007. № 20 (92). С. 46–49. EDN: KWUPRZ

5. Королев А. А., Тюрина С. Б., Тришканева М. В. Анализ применения микроволнового излучения в технологиях стерилизации растительного сырья // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2019. № 3. С. 81–91. DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-3-81-91; EDN: CMIWZY

6. Decareau R. V. Microwaves in the food processing industry. Orlando etc.: Acad. Press; 1985. 234 p.

7. Khalil H. M., Villota R. Comparative Study on Injury and Recovery of *Staphylococcus aureus* using Microwave and Conventional Heating // Journal of Food Protection. 1988. Vol. 51, iss. 3. Pp. 181–186. DOI: 10.4315/0362-028X-51.3.181

8. Tajchakavit S., Ramaswamy H. S., Fustier P. Enhanced destruction of spoilage microorganisms in apple juice during continuous flow microwave heating // Food Research International. 1998, Vol. 31, iss. 10. Pp. 713–722. DOI: 10.1016/S0963-9969(99)00050-2

9. Exposure to high-frequency electromagnetic field triggers rapid uptake of large nanosphere clusters by pheochromocytoma cells / P. G. T. Perera, T. H. P. Nguyen, C. Dekiwadia et al. // International Journal of Nanomedicine. 2018. Vol. 13. Pp. 8429–8442. DOI: 10.2147/IJN.S183767

10. Мельниченко А. В., Ихлов Б. Л., Оценков А. Ю. Способ быстрой одновременной стерилизации, дезинфекции и дезинсекции пищевых продуктов: пат. 2677783 С2 Российская Федерация, МПК А23L 3/01. № 2016150232: заявл. 20.12.2016; опубл. 21.01.2019. EDN: PMLQGE

11. Ихлов Б. Л., Шурыгин А. А., Дробкова В. А. Возможность бактерицидного действия СВЧ на штаммы *Mycobacterium avium* и *Mycobacterium*

tuberculosis // Туберкулез и болезни легких. 2019. Т. 97, № 1. С. 25–27. DOI: 10.21292/2075-1230-2019-97-1-25-27; EDN: YXGJQD

12. Старкова Д. А. *Mycobacterium avium* – актуальный возбудитель микобактериоза человека // Инфекция и иммунитет. 2013. Т. 3, № 1. С. 7–14. DOI: 10.15789/2220-7619-2013-1-7-14; EDN: QCUBVJ

13. Measuring the elasticity of poly-L-proline helices with terahertz spectroscopy / M. T. Ruggiero, J. Sibik, R. Orlando et al. // *Angewandte Chemie International Edition*. 2016. Vol. 55, iss. 24. Pp. 6877–6881. DOI: 10.1002/ange.201603825

14. Петрова Г. В., Буракаева А. Д., Сорокун С. В. Применение СВЧ-излучений для обеззараживания птичьего помёта // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 5 (85). С. 145–148. EDN: YNEOWI

15. Денисова Т. В., Колесников С. И. Влияние СВЧ-излучения на ферментативную активность и численность микроорганизмов почв Юга России // Почвоведение. 2009. № 4. С. 479–483. EDN: JXOUPD

16. Шамгунов И. И., Степура А. В. Исследование влияния предпосевного СВЧ-воздействия на морфологические показатели прорастающих семян яровой пшеницы // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2 (45). Ст. 85. EDN: ZEONNP

17. Повышение эффективности предпосевной СВЧ-обработки семян / Н. Д. Полевик, В. М. Попов, В. А. Бидянов и др. // Механизация и электрифика-

ция сельского хозяйства. 2012. № 5. С. 23–24. EDN: WWHYJZ

18. Старунов А. В., Нурписов Ж. А., Жикеев А. А. Влияние электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на всхожесть семян сорных растений // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2014. № 2 (46). С. 63–66. EDN: SFSCIX

19. Орлов В. В., Алфёров С. А. Методы предотвращения порчи сухих сельскохозяйственных продуктов при хранении // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2011. № 1. С. 229–231. EDN: NDKBYX

20. Действие СВЧ-излучения на метацеркарий описторхисов и личинок трихинелл / А. Н. Пельгунов, И. М. Одоевская, А. В. Хрусталева и др. // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2019. № 3. С. 265–272. DOI: 10.1134/S0002332919030081; EDN: EHOVVS

21. Вредители тепличных и оранжерейных растений (морфология, образ жизни, вредность, борьба) / А. К. Ахатов, С. С. Ижевский, Ю. И. Мешков и др. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2004. 307 с. EDN: QKWDBR

22. Яркуллов Ф. Я. Борьба с галловыми нематодами в закрытом грунте // Защита и карантин растений. 2006. № 8. С. 25–26. EDN: HTVRMD

23. Практикум по микробиологии / А. И. Нетрусов, М. А. Егорова, Л. М. Захарчук и др.; под ред. А. И. Нетрусова. М.: Академия, 2005. 608 с.

Статья поступила в редакцию 22.02.2024; одобрена после рецензирования 06.05.2024; принята к публикации 10.06.2024

Информация об авторах

МУХОРТОВ Дмитрий Иванович – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – использование нетрадиционных органических удобрений при искусственном лесовосстановлении. Автор 180 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0859-4224>; SPIN-код: 7646-2846

ОКАЧ Мария Александровна – аспирант кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – модификация корнезакрывающих субстратов. Автор 44 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7147-1676>; SPIN-код: 2097-0501

МАЙОРОВ Никита Дмитриевич – аспирант кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Автор пяти научных публикаций. SPIN-код: 6668-0698

Вклад авторов:

Мухорт Д. И. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; проведение статистического анализа; доработка текста и итоговых выводов; утверждение окончательного варианта статьи.

Окач М. А. – проведение исследований; проведение статистического анализа; интерпретация полученных данных; редактирование текста; разработка итоговых выводов.

Майоров Н. Д. – проведение исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630*232.422

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.6>

EDN: QBEZNM

Disinfection of Substrates for Growing Containerized Tree Seedlings**D. I. Mukhortov[✉], M. A. Okach, N. D. Mayorov**Volga State University of Technology,
3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation
MuhortovDI@volgatech.net[✉]

Abstract. *Introduction.* Production of ball-rooted planting stock compliant with relevant standards suggests the use of a quality root covering substrate during growing. The substrate must be characterized by the optimal physicochemical properties, absence of weed seeds and pathogenic microflora. Electromagnetic fields of ultrahigh frequencies are proposed to be used as an alternative method of disinfection. *The purpose* of the work is to determine an effective mode of disinfection of root covering substrates in an ultrahigh frequency electromagnetic field (microwave EMF). *The object* of the study was lowland peat modified with weed seeds. The experiment involved a quantitative analysis of the colony-forming units (CFUs) of microorganisms in the peat, as well as studying the germination capacity of weed seeds and the biometric parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and Norway spruce (*Picea abies*) seedlings. The effects of microwave radiation on the changes in the peat temperature and mass were investigated. *Results.* The analysis of the peat heating temperature variations depending on the microwave radiation mode showed that the intensity of peat heating depends on the power and exposure time of irradiation. The effective heating temperatures of 100–120° C were recorded at power levels of 600–800 W, with an exposure duration of 8–10 minutes, as well as at 450 W, with a 10-minute exposure. The minimum loss of the peat mass due to microwave irradiation was observed at power levels of 300–450 W, with an exposure time of 10 minutes. The study of the impact of microwave fields on microorganisms revealed both suppressive and stimulating effects of irradiation applied under different modes. The analysis of the results of the experiment on the effects of microwave radiation modes on the germination capacity of weed seeds found a total absence of weed seedlings when applying irradiation at a power of 200–450 W for 4–8 minutes. Scots pine seedlings grown on peat pre-treated with microwave irradiation exhibited an increase in the weight of seedlings as compared to the control. In Norway spruce seedlings, the germination energy of seeds decreased, while the root collar diameter significantly increased. *Conclusion.* The optimal mode of peat sterilization via microwave irradiation was found to be at a power of 300 W, with the exposure time of 10 minutes. The microwave radiation modes that inhibit seed germination were determined. Peat disinfection by microwave irradiation has a positive effect on the weight of Scots pine seedlings and reduces the germination energy of Norway spruce seeds.

Keywords: forest planting material; root-covering substrate; ultrahigh frequency electromagnetic field; effective heating temperature; microorganisms; weed seeds

Funding: this study was not supported by any external sources of funding.

For citation: Mukhortov D. I., Okach M. A., Mayorov N. D. Disinfection of Substrates for Growing Containerized Tree Seedlings. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024;(2):6–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.6>; EDN: QBEZNM

REFERENCES

1. Bobushkina S. V., Senkov A. O., Fayzulin D. H. Practice on growing of forest containerized seedlings applicable to the greenhouse complexes of the Arkhangelsk region. *Forest Science Issues.* 2020;3(4):1–16. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1–16; EDN: DRMUYF (In Russ.).
2. Cherpakov V. V. Distribution and harmfulness of bacterial diseases of forest species in Russia. *Plant Protection and Quarantine.* 2015;(11):19–21. EDN: UMSPNL (In Russ.).
3. Tolchin A. E., Muhortov D. I., Droshneva O. N. Natural decrease germination of weed seeds in root closing substrate at microwave irradiation root closing. *Trudy Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Seriya: Tehnologicheskaja.* 2015;(3):54–59. EDN: UIZIYJ (In Russ.).

4. Baranov L. A., Burnaev M. G. Device for electrothermal treatment of protected soil. *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"*. 2007;(20(92)):46–49. EDN: KWUPRZ (In Russ.).
5. Korolev A. A., Tyurina S. B., Trishkanova M. V. The application of microwave radiation for sterilization of plant raw materials. *Scientific journal NRU ITMO. Series "Processes and Food Production Equipment"*. 2019;(3):81–91. DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-3-81-91; EDN: CMIWZY (In Russ.).
6. Decareau R. V. Microwaves in the food processing industry. Orlando etc.: Acad. Press; 1985. 234 p.
7. Khalil H. M., Villota R. Comparative study on injury and recovery of *Staphylococcus aureus* using microwave and conventional heating. *Journal of Food Protection*. 1988;51(3):181–186. DOI: 10.4315/0362-028X-51.3.181
8. Tajchakavit S., Ramaswamy H. S., Fustier P. Enhanced destruction of spoilage microorganisms in apple juice during continuous flow microwave heating. *Food Research International*. 1998;31(10):713–722. DOI: 10.1016/S0963-9969(99)00050-2
9. Perera P. G. T., Nguyen T. H. P., Dekiwadia C. et al. Exposure to high-frequency electromagnetic field triggers rapid uptake of large nanosphere clusters by pheochromocytoma cells. *International Journal of Nanomedicine*. 2018;13:8429–8442. DOI: 10.2147/IJN.S183767
10. Melnichenko A. V., Ikhlov B. L., Oshchepkov A. Yu. Method of quick simultaneous sterilization, disinfection and disinsection of food products. Patent RF 2677783, 21 January 2019. (In Russ.).
11. Ikhlov B. L., Shurygin A. A., Drobkova V. A. Potential bactericidal action of UHF on the strains of *Mycobacterium avium* and *Mycobacterium tuberculosis*. *Tuberculosis and Lung Diseases*. 2019;97(1):25–27. DOI: 10.21292/2075-1230-2019-97-1-25-27; EDN: YXGJQD (In Russ.).
12. Starkova D. A. *Mycobacterium avium* as an actual pathogen of human mycobacteriosis. *Russian Journal of Infection and Immunity*. 2013;3(1):7–14. DOI: 10.15789/2220-7619-2013-1-7-14; EDN: QCUBVJ (In Russ.).
13. Ruggiero M. T., Sibik J., Orlando R. et al. Measuring the elasticity of poly-l-proline helices with terahertz spectroscopy. *Angewandte Chemie International Edition*. 2016;55(24):6877–6881. DOI: 10.1002/ange.201603825
14. Petrova G. V., Burakaeva A. D., Sorokun S. V. Application of microwave radiation for poultry dung disinfection. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;(5(85)):145–148. EDN: YNEOWI (In Russ.).
15. Denisova T. V., Kolesnikov S. I. The influence of super-high-frequency radiation on the enzyme activity and number of microorganisms in soils of Southern Russia. *Eurasian Soil Science*. 2009;(4):479–483. EDN: JXOUPD (In Russ.).
16. Shamgunov I. I., Stepura A. V. Investigation of the influence of presowing microwave effect on the morphological parameters of germinating seeds of spring wheat. *Engineering Journal of Don*. 2017;(2(45)). Art. 85. EDN: ZEONNP (In Russ.).
17. Polevik N. D., Popov V. M., Bidjanov V. A. et al. Increasing the efficiency of pre-sowing microwave seed treatment. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2012;(5):23–24. EDN: WWHYJZ (In Russ.).
18. Starunov A. V., Nurpisov Zh. A., Zhikeev A. A. Impact of electromagnetic radiation of microwaves on weed plants germinating power. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2014;(2(46)):63–66. EDN: SFSCIX (In Russ.).
19. Orlov V. V., Alferev S. A. Methods to prevent spoilage of dry agricultural products in storage. *Scientific journal NRU ITMO. Series "Processes and Food Production Equipment"*. 2011;(1):229–231. EDN: NDKBYX (In Russ.).
20. Pelgunov A. N., Odoevskaya I. M., Khrustalev A. V. et al. The effect of microwave radiation on metacercaries of opisthorchiss and larvae of trichinella. *News of the Russian Academy of Sciences. Biological Series*. 2019;(3):265–272. DOI: 10.1134/S0002332919030081; EDN: EHOVVS (In Russ.).
21. Ahatov A. K., Izhevskij S. S., Meshkov Ju. I. Pests of greenhouse and warmhouse plants (morphology, lifestyle, harmfulness, control). Moscow: Tovarihestvo nauchnyh izdanij KMK; 2004. 307 p. EDN: QKWDBR (In Russ.).
22. Yarkulov F. Ya. Control of root-knot nematodes in protected ground. *Plant Protection and Quarantine*. 2006;(8):25–26. EDN: HTVRMD (In Russ.).
23. Netrusov A. I., Egorova M. A., Zakhar-chuk L. M. et al. Practical training in microbiology. Netrusov A. I. (ed.). Moscow: Akademiya; 2005. 608 p. (In Russ.).

The article was submitted 22.02.2024; approved after reviewing 06.05.2024;
accepted for publication 10.06.2024

Information about the authors

Dmitry I. Mukhortov – Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor and Head of the Chair of Forest Plantations, Selection, and Biotechnology, Volga State University of Technology. Research interests – usage of non-conventional inorganic fertilizers for artificial reforestation. Author of 180 publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0859-4224>; SPIN: 7646-2846

Maria A. Okach – Postgraduate student at the Chair of Forest Plantations, Selection, and Biotechnology, Volga State University of Technology. Research interests – modification of root-covering substrates. Author of 44 publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7147-1676>; SPIN: 2097-0501

Nikita D. Majorov – Postgraduate student at the Chair of Forest Plantations, Selection, and Biotechnology, Volga State University of Technology. Author of five publications. SPIN: 6668-0698

Contribution of the authors:

Mukhortov D. I. – academic advising; conceptualization; methodology development; statistical analysis; refining the text and final conclusions; approval of the final version of the article.

Okach M. A. – conducting research; statistical analysis; interpretation of findings; text review and editing; drafting the final conclusions.

Majorov N. D. – conducting research.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.