

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 632.08

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-4-14>

Сравнительный анализ эффективности тепловой обработки слоя почвы СВЧ-излучателями различных типов волноводов

С.С. Воложанинов¹, Н.В. Алдошин², А.А. Завалий³, Д.Д. Волобуев⁴^{1,3,4}Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; г. Симферополь, Россия²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ s.volozhaninov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>² naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>³ zavalym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>⁴ volobyev99@mail.ru

Аннотация. Сверхвысокие частоты (СВЧ) электромагнитного излучения, воздействуя на слой почвы, способны угнетать микроорганизмы, яйца и личинки насекомых на глубину проникновения СВЧ-излучения в почву. Эффективность тепловой обработки слоя почвы определяется типом волновода СВЧ-излучателя. Исследования проведены с целью выбора наиболее эффективного типа волновода СВЧ-излучателя. В качестве волноводов рассматривали камеру стоячей волны, камеру бегущей волны и камеру лучевого типа. С использованием вычислительных моделей COMSOL Multiphysics выполнено моделирование теплового воздействия СВЧ-излучения на слой почвы глубиной 100 мм, влажностью 5, 10 и 20%. В зависимости от типа волновода изменяли размер облучаемого участка поверхности почвы от 40 × 88 до 134 × 201 мм и мощность источника излучения (антенна магнетрона) – от 650 до 5000 Вт при частоте излучения 2450 МГц. Моделирование воздействия СВЧ-излучения показало, что при тепловой обработке контакт волновода с почвой является необязательным. Эффективность СВЧ-излучения увеличивается с повышением влажности почвы, но при этом наблюдается неравномерность нагрева слоя почвы в объеме. В результате сравнительного анализа эффективности тепловой обработки слоя почвы СВЧ-излучателями с различными волноводами выявили, что на почве влажностью 10...20% является более предпочтительным использование волновода с камерой бегущей волны, передающего слою почвы 72...88% энергии источника излучения, и поглощается 60...85% энергии источника излучения. Высокий уровень мощности волновода и мощности нагрева, а также высокий уровень равномерности нагрева слоя почвы обеспечиваются при использовании волновода с камерой бегущей волны и влажности почвы 10%. Результаты моделирования подлежат экспериментальной проверке и послужат основой для разработки СВЧ-излучателя для тепловой обработки слоя почвы в теплицах и парниках.

Ключевые слова: слой почвы; СВЧ; СВЧ-излучатель; волновод; моделирование теплового воздействия СВЧ-излучения; эффективность тепловой обработки слоя почвы; эффективность СВЧ-излучения

Для цитирования: Воложанинов С.С., Алдошин Н.В., Завалий А.А., Волобуев Д.Д. Сравнительный анализ эффективности тепловой обработки слоя почвы СВЧ-излучателями различных типов волноводов // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 2. С. 4-14. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-4-14>

ORIGINAL ARTICLE

Comparative analysis of the efficiency of thermal treatment of the soil layer with microwave emitters of various waveguide types

S.S. Volozhaninov¹✉, N.V. Aldoshin², A.A. Zavaliiy³, D.D. Volobuev⁴

^{1,3,4} V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol, Russia

² Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

¹ s.volozhaninov@mail.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>

² naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

³ zavalym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>

⁴ volobuev99@mail.ru

Abstract. Ultra-high frequency (UHF) microwave radiation can effectively suppress soil microorganisms, insect eggs, and larvae within the depth of radiation penetration. Since the efficiency of thermal soil treatment is largely determined by the emitter's configuration, this study aimed to identify the most effective waveguide type. Three designs were evaluated – standing wave, traveling wave, and beam-type chambers. Using COMSOL Multiphysics, the authors simulated the thermal effects of microwave radiation on a 100 mm soil layer with moisture levels of 5%, 10%, and 20%. Depending on the waveguide type, the irradiated surface area varied from 40 × 88 mm to 134 × 201 mm, with magnetron antenna power ranging from 650 to 5000 W at a frequency of 2450 MHz. The simulations demonstrated that direct contact between the waveguide and the soil is unnecessary for effective treatment. While microwave efficiency increases with soil moisture, higher moisture levels also lead to non-uniform volumetric heating. Comparative analysis revealed that for soil moisture between 10% and 20%, the traveling wave chamber is the superior choice, transmitting 72-88% of source energy and achieving 60-85% energy absorption. Optimal performance, characterized by high power output and heating uniformity, was observed using a traveling wave chamber at 10% soil moisture. These simulation results, pending experimental verification, provide a foundation for developing specialized microwave systems for thermal soil treatment in greenhouses and hotbeds.

Keywords: soil layer; microwave; microwave emitter; waveguide; simulation of the thermal effect of microwave radiation; efficiency of thermal treatment of the soil layer; efficiency of microwave radiation

For citation: Volozhaninov S.S., Aldoshin N.V., Zavaliiy A.A., Volobuev D.D. Comparative analysis of the efficiency of thermal treatment of the soil layer with microwave emitters of various waveguide types. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):4-14 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-4-14>

Введение

К перспективным и активно развивающимся агротехнологиям относятся технологии обеззараживающей обработки почвы в теплицах и парниках без применения химических средств¹ [1, 2]. К ним, в частности, относятся технологии теплового обеззараживания [3, 4], в которых к угнетению и гибели патогенных микроорганизмов приводит нагрев слоя почвы, осуществляемый подводом тепловой энергии, энергии электрического тока или электромагнитного излучения [5, 6], в том числе в диапазоне сверхвысоких частот [7, 8]. Использование сверхвысоких частот (СВЧ) электромагнитного излучения имеет ряд преимуществ по сравнению с другими механическими [9, 10] и тепловыми методами [11, 12]: оказывает действие на слой почвы на глубину проникновения СВЧ-излучения без внедрения органов обработки

в массив почвы, обладает угнетающим действием на широкий спектр микроорганизмов, яйца и личинки насекомых [13, 14], благодаря термическому и олиготермическому эффектам [15, 16], имеет наименьшие по сравнению с другими тепловыми методами обработки потери энергии, так как вся сгенерированная энергия излучения попадает внутрь слоя почвы [17, 18]. Потери энергии СВЧ-обработки определяются только потерями самих СВЧ-излучателей. Выбор СВЧ-излучателя для нагрева слоя почвы осуществляется на основании показателей качества обработки слоя почвы, к которым относятся:

- температура слоя после нагрева в течение заданного промежутка времени при заданной мощности источника излучения (оценка среднего значения температуры слоя почвы и дисперсия температуры слоя почвы);
- глубина прогрева слоя почвы до заданного значения температуры;
- пространственная локализация области нагрева слоя почвы;

¹ Методы физического обеззараживания почвы. URL: <https://rukav22.ru/c/metody-obezzarajivaniya-pochvy>. (дата обращения: 22.11.2024).

– энергетическая эффективность тепловой обработки слоя почвы (отношение передаваемой по волноводу энергии электромагнитного излучения к энергии, излучаемой антенной магнетрона, и отношение поглощенной слоем почвы энергии электромагнитного излучения к излучаемой антенной магнетрона энергии электромагнитного излучения)² [19].

Рассматриваемые в статье излучатели представляют собой СВЧ-излучатели с волноводом, включающим в себя камеру со стоячей волной (КСВ), камеру с бегущей волной (КБВ) и камеру лучевого типа (КЛТ) (рис. 1).

Из теории волноводов^{3,4,5} известно, что передаваемый по волноводу поток энергии электромагнитного излучения представляет собой векторную сумму потока энергии излучения антенны магнетрона и потока отраженной от поверхности раздела среды волновода и поглощающей излучение среды. В случае СВЧ-воздействия на слой почвы средой волновода

выступает воздух, а средой поглощения – почва. В камерах со стоячей волной поток отраженной энергии, как правило, выше, чем в камерах лучевого типа и в камерах с бегущей волной⁶.

Цель исследований: сравнение показателей СВЧ-излучателей с волноводами, выполненных в виде камер стоячей и бегущей волны и лучевого типа, для определения энергетической эффективности тепловой обработки слоя почвы.

Материалы и методы

Инструментом исследований является конечно-элементный программный комплекс для решения мультифизических задач COMSOL Multiphysics⁷. Для анализа выбрана глубина слоя почвы, равная 100 мм. Размеры облучаемого участка поверхности почвы составляют от 40 × 88 до 134 × 201 мм в зависимости от типа волновода. Теплофизические и электромагнитные свойства почвы приведены в таблице. На рисунке 2 представлены проекционные

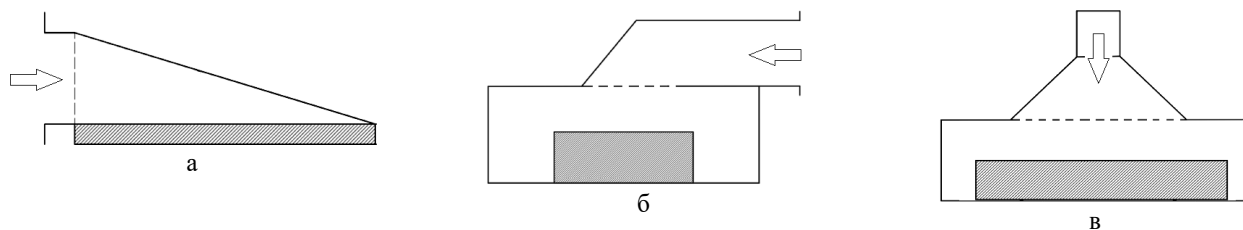


Рис. 1. Схемы волноводов для нагрева диэлектрических материалов:

а – камера со стоячей волной (КСВ); б – камера с бегущей волной (КБВ); в – камера лучевого типа (КЛТ)

Fig. 1. Waveguide designs for heating dielectric materials:

a – a standing wave chamber (SWC); b – a traveling wave chamber (TWC); c – a beam-type chamber (BTC)

Свойства почвы, принятой к моделированию

Таблица

Table of soil properties used for modeling

Table

№	Свойства почвы					
	Влажность почвы, %	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/(кг · К)	Теплопроводность, Вт/(м · К)	Относительная диэлектрическая проницаемость ⁸	Электрическая проводимость, См/м ⁹
1	5	1100	1150	0,8	3	0,005
2	10	1200	1250	0,85	15	0,1
3	20	1300	1350	0,9	30	0,5

² Электропрогрев грунта. Стройматериалы: сайт. URL: <http://www.stroimt.ru/warminggront/?ysclid=mff8spiepl564357313> (дата обращения: 11.09.2025).

³ Левин Л. Современная теория волноводов: методы решения волноводных задач / Пер. с англ.; Под ред. В.И. Вольмана. М.: Радио и связь, 1981. 311 с.

⁴ Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ электротермии. Саратов: Научная книга, 2011. 559 с.

⁵ Архангельский Ю.С., Колесников Е.В. Камеры с бегущей и со стоячей волной. Саратов: Буква, 2015. 230 с.

⁶ Архангельский Ю.С., Тригорлый С.В. СВЧ электротермические установки лучевого типа. Саратов, 2000. 122 с.

⁷ Курушин А.А. Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL. М.: One-Book, 2016. 376 с

⁸ Электронный ресурс. Режим доступа: <https://konspekta.net/studopedianet/baza7/572746186364.files/image085.png> (дата обращения: 09.10.2025).

⁹ Электронный ресурс. Режим доступа: https://studfile.net/html/1334/288/html_SzT016FBAL.l0og/img-ummcB6.png (дата обращения: 09.10.2025).

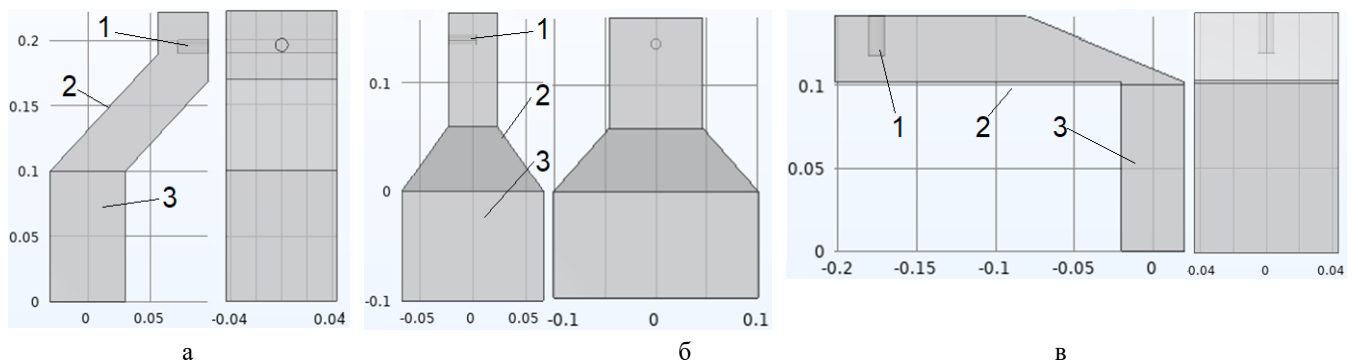


Рис. 2. Геометрия рассматриваемых волноводов:

а – камера со стоячей волной (КСВ); б – камера с бегущей волной (КБВ); в-камера лучевого типа (КЛТ); 1 – антенна магнетрона (диаметр – 10 мм, высота – 24 мм); 2 – волновод; 3 – слой почвы

Fig. 2. Geometry of the waveguides under consideration:

а – a standing wave chamber (SWC); б – a traveling wave chamber (TWC); в – a beam-type chamber (BTC); 1 – magnetron antenna (diameter 10 mm, height 24mm); 2 – waveguide; 3 – soil layer

изображения волноводов со слоем почвы: волновод КСВ с наклонным каналом (а), рупорный волновод КЛТ (б), волновод с камерой бегущей волны КБВ (в), угол положения наклонной поверхности – 24° . Для волновода КБВ рассмотрено три варианта угла положения наклонной поверхности: 10, 24 и 45° . Мощность источника излучения (антенны магнетрона) выбрана пропорционально объему слоя почвы: $100 \times 60 \times 88$ мм – волновод КСВ (мощность 1000 Вт); $100 \times 134 \times 201$ мм – волновод КЛТ (мощность 5000 Вт); $100 \times 40 \times 88$ мм – волновод КБВ (мощность 670 Вт). Начальная температура слоя почвы – 20°C . Поверхности волновода и слоя почвы теплоизолированы от окружающей среды.

Результаты и их обсуждение

Представление о пространственной локализации области нагрева слоя почвы влажностью 5, 10 и 20% дают карты изолиний температуры слоя почвы после 60 с нагрева СВЧ-излучателем с волноводом КСВ, КБВ и КЛТ (рис. 3).

На рисунке 4 даны гистограммы распределения температуры в слое почвы для расчетов нагрева почвы СВЧ-излучателями, представленных на рисунке 3. На рисунке 5 отображены средние значения температуры слоя и рассеяние (С.К.О.) в слое почвы, на рисунке 6 – доля объема слоя почвы с температурой более 60°C .

Карты изолиний нагрева слоя почвы показывают, что поток энергии электромагнитного излучения волноводами направлен в основном вниз по вертикальной оси симметрии слоя почвы. Волновод с наклонным каналом и волновод с камерой бегущей волны направляют поток энергии вниз с незначительным уклоном к передней стенке слоя почвы, волновод с камерой лучевого типа разделяет поток энергии

на два, образуя в центральной части слоя почвы область пониженной температуры.

Гистограммы на рисунке 4 позволяют сделать вывод о том, что наибольшая равномерность прогрева наблюдается в случае волновода КСВ и волновода КБВ при влажности почвы 10%: максимум частоты значений температуры в расчетных узлах слоя почвы близок к среднему значению температуры в слое. Чем меньше рассеяние значений температуры в узлах слоя почвы от среднего значения, тем более равномерным является прогрев всего слоя. Значения средних величин температуры в объеме слоя почвы и величин рассеяния относительно средних, приведенные на рисунке 5, подтверждают высокую равномерность прогрева для волноводов КСВ и КБВ при влажности почвы 10%: величина С.К.О. меньше среднего значения в 1,8...2,2 раза. Значения средних температур нагрева слоя почвы показывают, что нагрев с использованием волновода КБВ в 2,5 раза больше нагрева волноводом КСВ и в 2 раза больше нагрева волноводом КЛТ. Доля объема слоя почвы с температурой более 60°C при нагреве волноводом КБВ в 2,5...3 раза выше, чем при использовании волноводов КСВ и КЛТ (рис. 6).

Меньшая доля отраженного от почвы излучения, направленного на источник (антенну магнетрона), – основа энергетического преимущества волновода КБВ перед волноводами КСВ и КЛТ. Доля мощности, передаваемой по каналу магнетрона электромагнитной энергии (мощность волновода), и доля поглощаемой слоем почвы энергии (мощность нагрева) от излучаемой антенной магнетрона мощности в зависимости от влажности почвы представлены на рисунке 7.

Из диаграммы следует, что мощность волновода КСВ составляет не более 45% от генерируемой

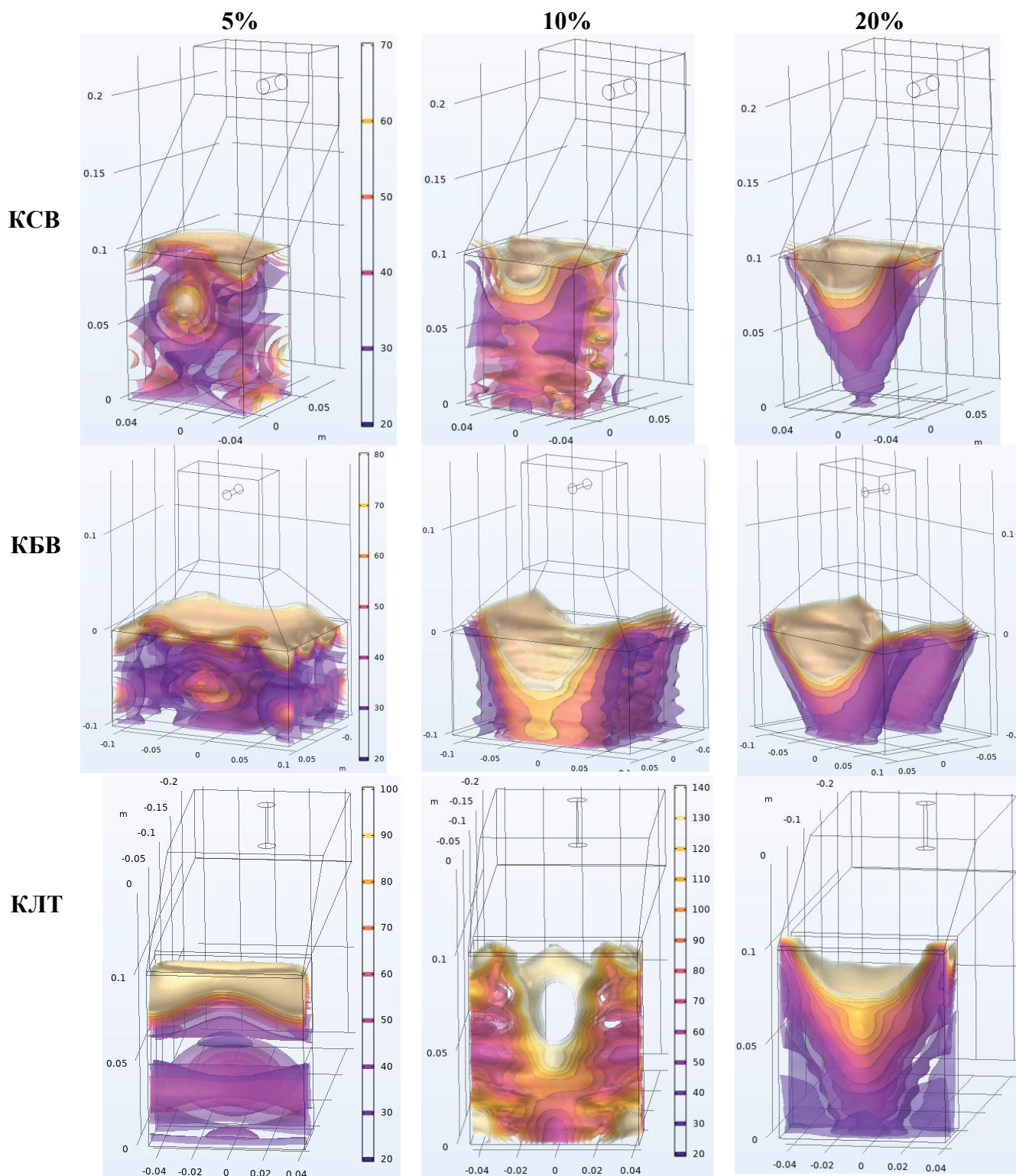


Рис. 3. Карты изолиний нагрева слоя почвы влажностью 5, 10, 20% различными волноводами в течение 60 с
Fig. 3. Isothermal distribution maps in the soil layer (5%, 10%, and 20% moisture) for different waveguide configurations after 60 s of exposure

источником излучения мощности, мощность волновода КЛТ – 65%, а волновода КБВ – 85...87%. Доля поглощенной слоем почвы энергии увеличивается с ростом влажности почвы. На диаграмме (рис. 7) приведены данные для случая размещения под слоем почвы металлической пластины для

отражения излучения, проходящего сквозь слой почвы. При сухой почве (влажность 5%) металлическая пластина позволяет повысить долю мощности волновода КСВ (на диаграмме обозначен как КСВм) до значений для волновода КБВ; при более влажной почве доля мощности волновода

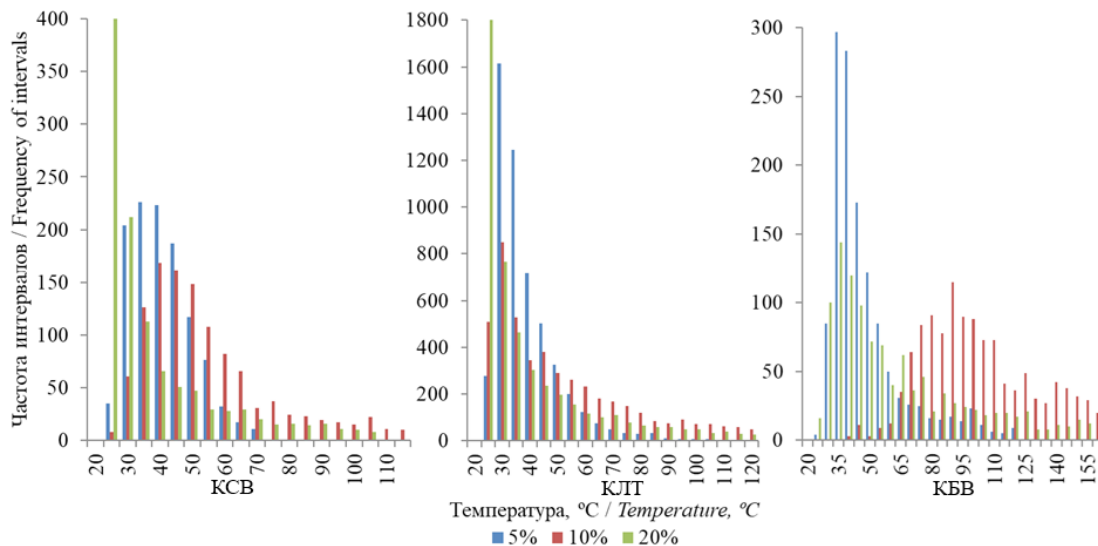


Рис. 4. Распределение температуры в слое почвы

Fig. 4. Temperature distribution in the soil layer

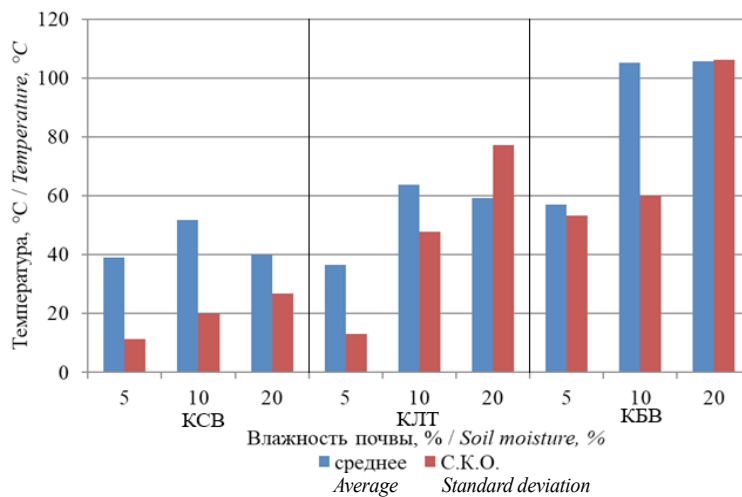


Рис. 5. Среднее значение температуры и рассеяние (С.К.О.) в слое почвы

Fig. 5. Average temperature and scattering (standard deviation) in the soil layer

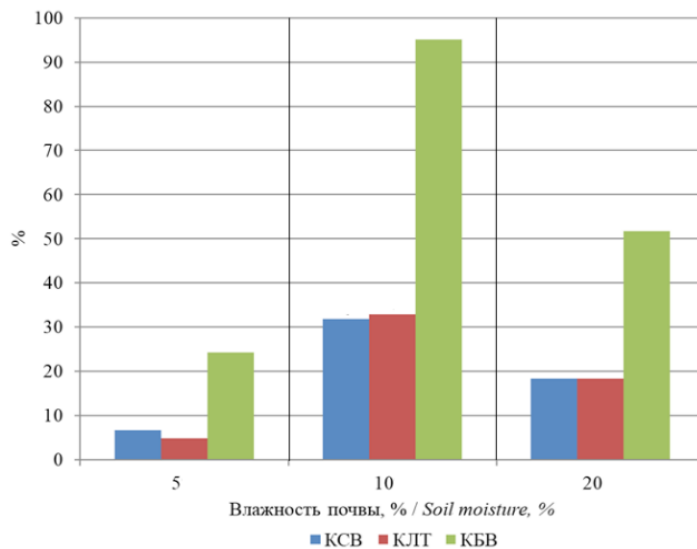


Рис. 6. Доля объема слоя почвы с температурой более 60°C

Fig. 6. Volume fraction of the soil layer with a temperature exceeding 60°C

снижается до величин, меньших, чем при отсутствии пластины.

Изменение угла положения наклонной поверхности КБВ волновода от базового значения 24° в большую (45°) и меньшую (10°) стороны привело к незначительному уменьшению мощности

волновода и, соответственно, мощности нагрева слоя почвы (рис. 8). Значения средних температур объема слоя почвы при изменении угла наклона поверхности также уменьшились (рис. 9).

Рассмотрим нагрев слоя почвы СВЧ-излучателем с волноводом КБВ (угол наклона волновода – 24°)

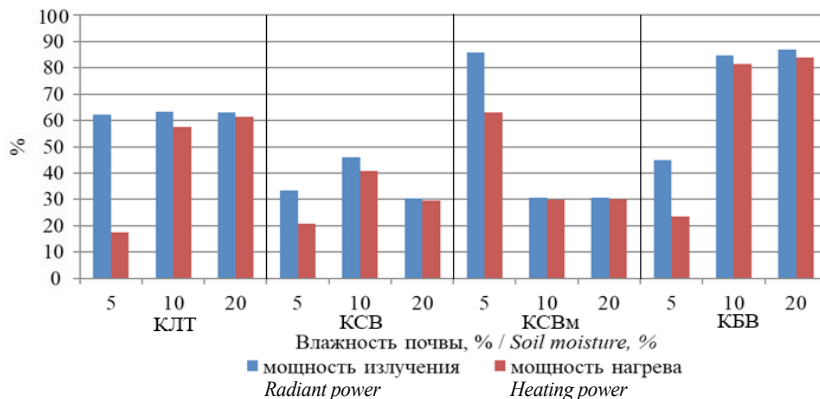


Рис. 7. Доли мощности волновода и нагрева слоя почвы

Fig. 7. Waveguide and soil layer heating power fractions

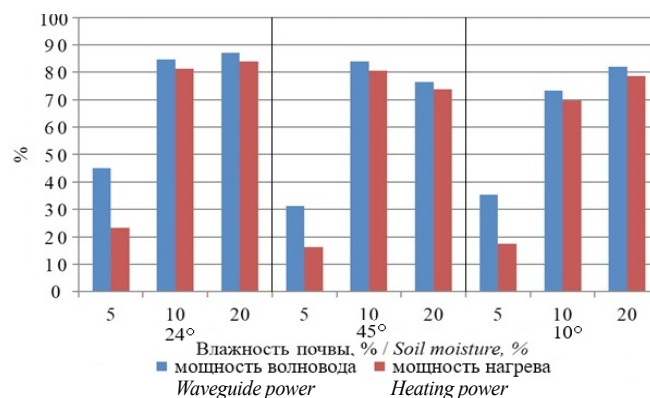


Рис. 8. Доли мощности волновода КБВ и нагрева слоя почвы при различных углах наклона волновода

Fig. 8. TWC waveguide and soil heating power fractions at various waveguide inclination angles

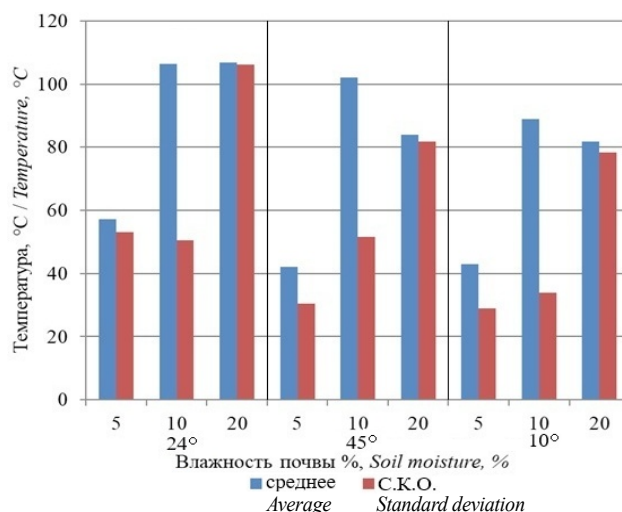


Рис. 9. Среднее значение температуры и рассеяния (С.К.О.) в слое почвы при различных углах положения наклонной поверхности волновода КБВ

Fig. 9. Average temperature values and scattering (standard deviation) in the soil layer at different angles of the inclined surface of the TWC waveguide

при размещении среза волновода на высоте h от поверхности почвы (рис. 10). Размеры расчетного слоя почвы составляют $60 \times 88 \times 100$ мм, мощность источника излучения – 1000 Вт, продолжительность нагрева – 60 с, начальная температура слоя почвы – 20°C . В расчетах высота h принята равной 0, 5, 10 и 20 мм, влажность почвы – 5, 10 и 20%.

На рисунке 11 приведены карты изотерм в слое почвы для принятых значений высоты h и влажности почвы.

Доли мощности волновода и мощности нагрева от излучаемой антенной магнетрона мощности

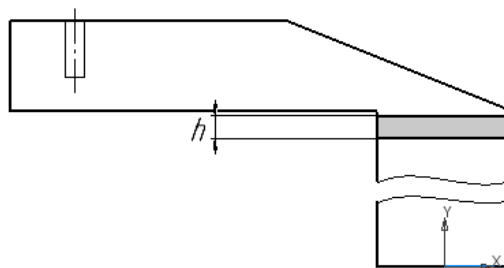


Рис. 10. Схема размещения волновода КБВ над слоем почвы

Fig. 10. Layout of the TWC waveguide above the soil layer

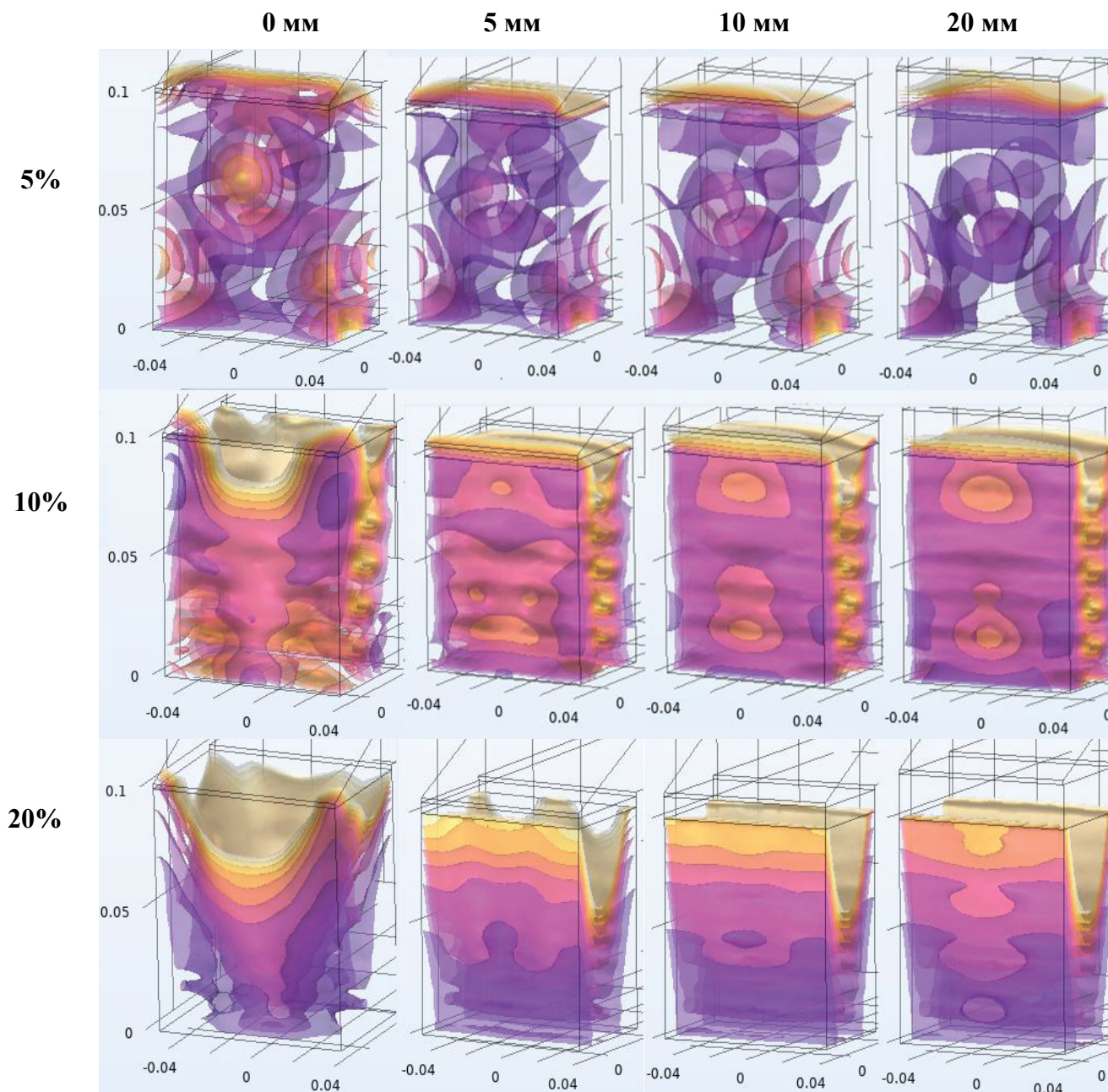


Рис. 11. Карты изотерм слоя почвы влажностью 5, 10, 20% при высоте воздушного зазора 0, 5, 10, 20 мм и продолжительности нагрева 60 с

Fig. 11. Isothermal maps of the soil layer (5%, 10%, and 20% moisture) at air gap heights of 0, 5, 10, and 20 mm after 60 s of heating

представлены на рисунке 12. Зависимость изменения среднеобъемного значения температуры слоя почвы и рассеяния температуры в слое от высоты воздушного зазора h для волновода КБВ приведены на рисунке 13.

Анализ результатов моделирования нагрева слоя почвы СВЧ-излучателем с волноводом КБВ при размещении среза волновода на высоте h от поверхности почвы позволяет сделать следующие выводы.

1. Изменение высоты воздушного зазора между срезом волновода и поверхностью слоя почвы в пределах от 0 до 20 мм не приводит к существенному изменению локализации и степени нагрева слоя почвы; незначительно также изменяется мощность волновода и мощность нагрева слоя почвы, что позволяет размещать СВЧ-излучатель над поверхностью

обрабатываемой почвы, исключая контакт волновода с почвой во время эксплуатации.

2. Эффективность СВЧ-излучения повышается с ростом влажности почвы, но при этом существенно увеличивается неравномерность нагрева объема слоя (чрезмерный нагрев поверхности почвы и малый нагрев на глубине).

3. Мощность волновода КБВ составляет 72...88% от мощности источника излучения при влажности слоя почвы 10...20%. При этом поглощенная слоем почвы мощность достигает 60...85%.

4. Наиболее эффективным является использование СВЧ-излучателя с волноводом КБВ на почве влажностью 10%: обеспечивается высокий уровень мощности волновода и мощности нагрева и высокий уровень равномерности нагрева слоя почвы.

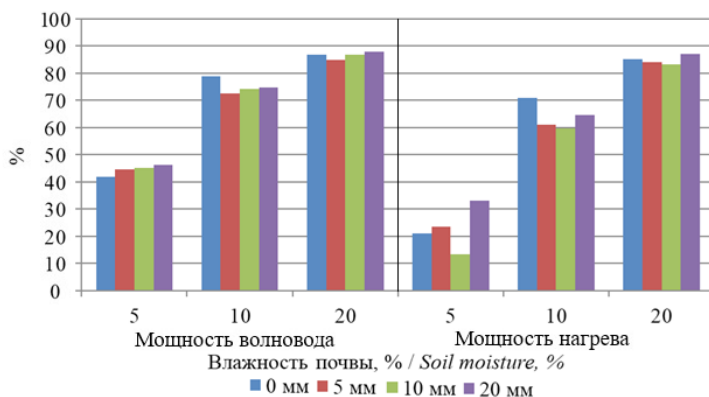


Рис. 12. Доли мощности волновода КБВ и нагрева слоя почвы влажностью 5, 10, 20% при высоте воздушного зазора 0, 5, 10, 20 мм

Fig. 12. Fraction of the power of the TWC waveguide and the heating of the soil layer with a soil moisture of 5, 10, and 20% at an air gap height of 0.5, 10, and 20 mm

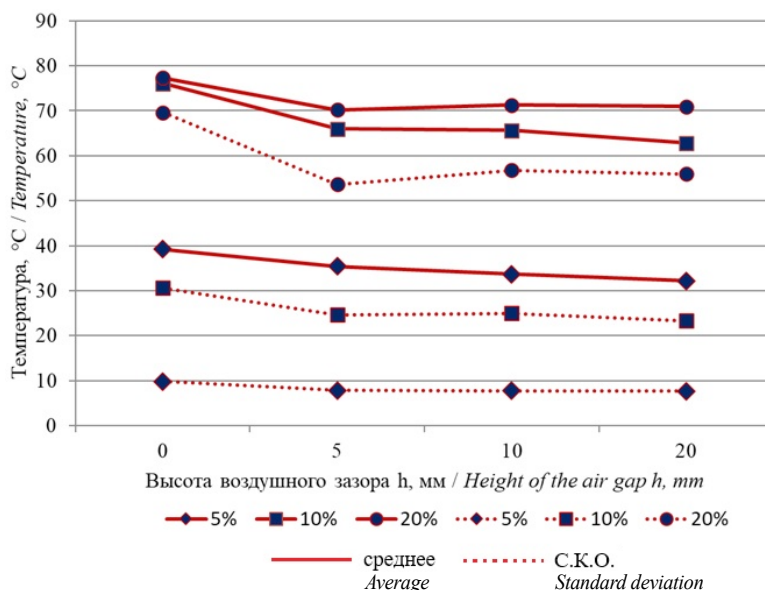


Рис. 13. Изменение среднеобъемного значения температуры слоя почвы и рассеяния температуры в слое от высоты воздушного зазора h для волновода КБВ

Fig. 13. Variation in volume-averaged soil temperature and temperature distribution within the layer relative to the air gap height h for a TWC waveguide

Выводы

Для нагрева слоя почвы СВЧ-излучением предпочтительно использовать волноводы КБВ, обеспечивающие передачу слою почвы 72...88% энергии источника излучения и поглощение слоем почвы влажностью 10...20% от 60 до 85% энергии источника излучения.

Список источников

1. Хамуков Ю.Х., Канокова М.А. Земледелие и вспашка. Вспашка как антропогенный фактор деградации экосистем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6 (110). С. 225-235. EDN: VHSXQV
2. Косолапов В.М., Цыгуткин А.С., Алдошин Н.В., Лылин Н.А. Агрономические основы инженерного обеспечения биологизации земледелия // Кормопроизводство. 2022. № 3. С. 41-47. EDN: IZUIQD
3. Bondarenko O., Boshkova I. Evaluation of the efficiency of microwave heating of soils. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023;4(1):40-47. EDN: FAFLNK
4. Brodie G., Torgovnikov G. Microwave soil heating with evanescent fields from slow-wave comb and ceramic applicators. *Energies*. 2022;15(3):1068. EDN: INMSXR
5. Brodie G., Khan M.J., Gupta D. et al. Understanding the energy requirements for microwave weed and soil treatment. *Global Journal of Agricultural Innovation, Research Development*. 2019;6:11-24. <https://doi.org/10.15377/2409-9813.2019.06.2>
6. Maynaud G., Baudoin E., Bourillon J. et al. Short-term effect of 915-MHz microwave treatments on soil physicochemical and biological properties. *European Journal of Soil Science*. 2019;70(3):443-453
7. Brodie G., Khan M.J., Gupta D. Microwave soil treatment and plant growth. *IntechOpen EBooks*. 2019:19. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.89684>
8. Молодцова М.А., Севастьянова Ю.В. Возможности и перспективы использования микроволнового излучения в промышленности (обзор) // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017. № 2. С. 173-187. EDN: YHESKL
9. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Голубев В.В. Обоснование приемов обработки почвы при освоении залежных земель // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13, № 1 (64). С. 28-35. EDN: SLJYVK
10. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений // Агроинженерия. 2021. № 1 (101). С. 26-35. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-1-26-35>
11. Кабалоев Т.Х., Гатуева К.К., Гокоев Т.М., Никколова Л.С. Температурное поле тепличной почвы при термоэлектрическом способе нагрева // Известия Горского государственного аграрного университета. 2018. Т. 55, № 4. С. 148-152. EDN: YRLMVN
12. Поспелова И.Г., Возмищев И.В., Ниязов А.М. К вопросу о способах обеззараживания почвы в защищенном грунте // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67, № 3(40). С. 45-49. EDN: NONPMR
13. Ихлов Б.Л., Мельниченко А.В., Ощепков А.Ю. Действие сверхвысокочастотного электромагнитного поля на микроорганизмы // Вестник новых медицинских технологий. 2017. Т. 24, № 2. С. 141-146. EDN: ZDHMGV
14. Zhang Z., Wang J., Hu Y., Wang L. Microwaves, a potential treatment for bacteria: A review. *Front. Microbiol.* 2022;13:1-14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.888266>

Приведенные результаты являются справедливыми для принятых к моделированию величин физических свойств почвы; результаты, полученные расчетным моделированием, подлежат экспериментальной проверке.

References

1. Khamukov Yu.Kh., Kanokova M.A. Arable farming and plowing. Plowing as an anthropogenic factor of ecosystem degradation. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022;6(110):225-235. (In Russ.)
2. Kosolapov V.M., Tsygutkin A.S., Aldoshin N.V., Lynin N.A. Mechanized agronomy as means for arable farming biologization. *Kormoproizvodstvo*. 2022;3:41-47. (In Russ.)
3. Bondarenko O., Boshkova I. Evaluation of the efficiency of microwave heating of soils. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023;4(1):40-47.
4. Brodie G., Torgovnikov G. Microwave soil heating with evanescent fields from slow-wave comb and ceramic applicators. *Energies*. 2022;15(3):1068.
5. Brodie G., Khan M.J., Gupta D. et al. Understanding the energy requirements for microwave weed and soil treatment. *Global Journal of Agricultural Innovation, Research Development*. 2019;6:11-24. <https://doi.org/10.15377/2409-9813.2019.06.2>
6. Maynaud G., Baudoin E., Bourillon J. et al. Short-term effect of 915-MHz microwave treatments on soil physicochemical and biological properties. *European Journal of Soil Science*. 2019;70(3):443-453.
7. Brodie G., Khan M.J., Gupta D. Microwave soil treatment and plant growth. *IntechOpen EBooks*. 2019:19. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.89684>
8. Molodtsova M.A., Sevastyanova Yu.V. Opportunities and prospects of microwave radiation in industry (review). *Russian Forestry Journal*. 2017;2:173-187. (In Russ.)
9. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Golubev V.V. Justification of tillage methods in the development of fallow lands. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2020;13(1):28-35. (In Russ.)
10. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V. Development prospects for methods and technical means of farm crop protection. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2021;1:26-35. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-1-26-35>
11. Kabaloev T.Kh., Gatuева K.K., Gokoev T.M., Nikkolovala L.S. Temperature field of greenhouse ground when thermoelectric method of heating. *Proceedings of Gorskoy State Agrarian University*. 2018;55(4):148-152. (In Russ.)
12. Pospelova I.G., Vozmishchev I.V., Niyazov A.M. Soil disinfection methods in protected ground. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2020;67(3):45-49. (In Russ.)
13. Ikhlov B.L., Melnichenko A.V., Oshchepkov A.Yu. The impact of microwave electromagnetic field on microbes. *Journal of New Medical Technologies*. 2017;24(2):141-146. (In Russ.)
14. Zhang Z., Wang J., Hu Y., Wang L. Microwaves, a potential treatment for bacteria: A review. *Front. Microbiol.* 2022;13:1-14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.888266>
15. Shakhmatov S.N. Energy-saving technologies for processing agricultural products. *Bulletin of KSAU*. 2002;1:49-56. (In Russ.)
16. Nikishina O.V., Morozov G.A. Combined soil treatment methods. *Electronics, Photonics and Cyberphysical Systems*. 2022;2(2):51-55. (In Russ.)

15. Шахматов С.Н. Энергоресурсосберегающие технологии обработки продукции сельскохозяйственного производства // Вестник КрасГАУ. 2002. № 1. С. 49-56. EDN: ZDORLJ

16. Никишина О.В., Морозов Г.А. Комбинированные методы обработки почв // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2, № 2. С. 51-55. EDN: LNRICH

17. Воложанинов С.С., Завалий А.А., Ржевская В.С. и др. Экспериментальное исследование влияния нагрева массива почвы сверхвысокочастотным излучением на количество микроорганизмов // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2025. № 41 (204). С. 153-167. EDN: PGWAXG

18. Воложанинов С.С., Алдошин Н.В., Завалий А.А., Волобуев Д.Д. Экспериментальное исследование температурного поля в слое почвы при нагреве сверхвысокочастотным излучением // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 6. С. 28-35. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-28-35>

19. Тригорлый С.В., Чудров А.А. Моделирование СВЧ-размораживания грунта // Вопросы электротехнологии. 2023. № 1. С. 14-20. EDN: EEBYRO

17. Volozhaninov S.S., Zavalay A.A., Rzhevskaya V.S. et al. Experimental study of the effect of heating of a soil mass by ultrahigh-frequency radiation on the number of microorganisms. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2025;41:153-167. (In Russ.)

18. Volozhaninov S.S., Aldoshin N.V., Zavalay A.A., Volobuev D.D. Experimental study of the temperature field in the soil layer when heated by ultrahigh frequency radiation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(6):28-35. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-28-35>

19. Trigorly S.V., Chudrov A.A. Modeling of microwave soil defrosting. *Voprosy elektrotekhnologii*. 2023;1:14-20. (In Russ.)

Сведения об авторах

¹ **Воложанинов Сергей Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры общетехнических дисциплин; s.volozhaninov@mail.ru✉;

<https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>; SPIN-код: 1333-7600

² **Алдошин Николай Васильевич**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник; naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; SPIN-код: 6032-9021

³ **Завалий Алексей Алексеевич**, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой общетехнических дисциплин; zavalym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>; SPIN-код: 3604-5109

⁴ **Волобуев Дмитрий Дмитриевич**, аспирант кафедры общетехнических дисциплин; volobuev99@mail.ru; SPIN-код: 9473-4130

^{1,3,4} Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; 295007, Российская Федерация, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4

² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

С.С. Воложанинов – проведение исследований, описание результатов и формулирование выводов исследований, создание черновика рукописи, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;

Н.В. Алдошин – актуальность проблемы, концептуализация;

А.А. Завалий – методология, научное руководство;

Д.Д. Волобуев – обзор источников литературы, подготовка графических материалов, проведение исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 23.10.2025, после рецензирования и доработки 26.02.2026, принята к публикации 26.03.2026

Author Information

Sergey S. Volozhaninov¹, PhD (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Technical Subjects; s.volozhaninov@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>; Scopus Autor ID: 57218094232

Nikolay V. Aldoshin², DSc (Eng), Professor, Chief Engineer; naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; Scopus Author ID: 5719413129; Researcher ID: AAD-6548-2022

Aleksei A. Zavalay³, DSc (Eng), Associate Professor, the head of the department of General Technical Subjects, zavalym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>; Scopus Author ID: 57214120527

Dmitry D. Volobuev⁴, postgraduate student of the Department of General Technical Subjects; volobuev99@mail.ru

^{1,3,4} V.I. Vernadsky Crimean Federal University; 295007, Russian Federation Republic of Crimea, Simferopol, Akademika Vernadskogo Ave., 4

² Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

Author Contribution

S.S. Volozhaninov – investigation; formal analysis; writing – original draft, review and editing of the manuscript;

N.V. Aldoshin – conceptualization;

A.A. Zavalay – methodology; research supervision;

D.D. Volobuev – literature review; visualization, investigation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism

Received 23.10.2025; Revised 26.02.2026; Accepted 26.03.2026