

Биометрическое обоснование эффективности роботизированной СВЧ-системы предпосевной обработки почвы: вегетационный опыт с кукурузой

Марат А. Шереужев^{✉ 1, 2}, Мадин А. Шереужев^{✉ 3}, А. Ю. Кишев¹

¹Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова
360030, Россия, Нальчик, проспект Ленина, 1в

²Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

³Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5

Аннотация. Статья посвящена повторному вегетационному опыту верификации агрономической пригодности СВЧ-воздействия на почву перед посевом кукурузы.

Цель исследований – верификация агрономической пригодности предпосевной СВЧ-обработки почвы перед посевом кукурузы. Необходимость повторного вегетационного опыта обусловлена методическими изъянами первоначального исследования (Шереужев и др., 2025), в котором доминировали качественные шкалы, а урожайные параметры оценивались на единичных початках без повторностей.

Материалы и методы исследования. Каждый из трех вариантов обработки почвы (механический контроль, паровой прогрев, микроволновое облучение) заложен в трехкратной повторности; для всех растений проведены биометрические замеры – сухая масса надземных органов, подсчет сформированных листьев, оценка ассимиляционной поверхности, а початки охарактеризованы средними по лотку (масса, длина, диаметр, число зерен). Дисперсионным анализом с попарными сравнениями проверена статистическая достоверность.

Результаты. Полученный результат на образце почвы после микроволновой обработки превзошел необработанный вариант по сухой биомассе, по листовой площади, по средней массе початка, по количеству зерен; засоренность сорняками существенно сократилась. Корреляция между плотностью сорного ценоза и биомассой культуры указывает на опосредованный механизм действия СВЧ-обработки через подавление конкурентов основной культуры.

Выводы. В рамках эксперимента получены числовые данные, которые представляют собой агрономическое техническое задание для конструирования роботизированного СВЧ-аппликатора для предпосевной обработки почвы. Применение роботизированного СВЧ-аппликатора может позволить существенно снизить использование гербицидов.

Ключевые слова: микроволновая обработка почвы, СВЧ-стерилизация, биометрический анализ, вегетационный опыт, кукуруза, засоренность сорняками, роботизированный аппликатор, надземная биомасса, площадь листьев, число зерен

Поступила 23.03.2026, одобрена после рецензирования 28.04.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Шереужев Марат А., Шереужев Мадин А., Кишев А. Ю. Биометрическое обоснование эффективности роботизированной СВЧ-системы предпосевной обработки почвы: вегетационный опыт с кукурузой // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 165–180. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-165-180

Biometric substantiation of the efficacy of pre-sowing microwave soil treatment: a pot experiment using maize

Marat A. Shereuzhev^{✉ 1, 2}, Madin A. Shereuzhev^{✉ 3}, A.Yu. Kishev¹

¹Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov
360030, Russia, Nalchik, 1v Lenin avenue

²Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
37-a, I. Armand street, Nalchik, 360000, Russia

³Bauman Moscow State Technical University
5, 2-nd Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia

Abstract. The article presents a repeated pot experiment aimed at verifying the agronomic feasibility of pre-sowing soil microwave treatment for maize cultivation.

Aim. This study aims to evaluate the technical and biological efficacy of utilizing microwave energy during early-stage soil preparation for maize. The necessity of a repeated pot experiment stems from methodological shortcomings in the initial study (Shereuzhev et al., 2025), which relied predominantly on qualitative scales and assessed yield parameters using individual ears without replication.

Materials and methods. Each of the three soil treatments (mechanical control, steam heating, and microwave irradiation) was performed in three replications. All plants underwent biometric measurements, including aboveground dry biomass, leaf count, and assimilation surface area. Ears were characterized by tray-average values for weight, length, diameter, and grain number per ear. Statistical significance was verified using analysis of variance with pairwise comparisons.

Results. Plants grown in the microwave-treated soil outperformed those in the untreated control in terms of aboveground dry biomass, leaf area, average ear weight, and grain count, while weed infestation was substantially reduced. The correlation between weed population density and crop biomass suggests an indirect mechanism of microwave action, where the suppression of competitors subsequently benefits the main crop.

Conclusions. The experiment yielded quantitative data that provide agronomic specifications for engineering a robotic microwave applicator for pre-sowing soil treatment. Implementing this robotic microwave applicator could significantly reduce herbicide dependency.

Keywords: microwave soil treatment, MW sterilization, biometric analysis, vegetation experiment, maize, weed infestation, robotic applicator, above-ground biomass, leaf area, kernel count

Submitted 23.03.2026,

approved after reviewing 28.04.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Shereuzhev Marat A., Shereuzhev Madin A., Kishev A.Yu. Biometric substantiation of the efficacy of pre-sowing microwave soil treatment: a pot experiment using maize. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 165–180. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-165-180

ВВЕДЕНИЕ

Засоренность посевов сорными растениями остается одной из главных причин потерь урожая: по данным ФАО, сорняки снижают сборы зерновых на 25–40 %, а в ряде регионов – до 70 % [1]. Традиционная химическая защита сопряжена с рисками загрязнения почвенно-грунтовых вод, накоплением резистентных биотипов и угрозой здоровью населения [2]. Как показано в концептуальном анализе Ю. Х. Хамукова и М. А. Каноковой [3],



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

многократная вспашка выступает антропогенным фактором деградации агроэкосистем, нарушая структуру почвенного биоценоза и стимулируя вторичное засорение. Это обосновывает необходимость перехода к физическим, нехимическим и минимально инвазивным методам предпосевной подготовки почвы.

Одним из наиболее перспективных физических методов является воздействие на почву микроволновым (СВЧ) излучением. При частоте 2,45 ГГц электромагнитная энергия поглощается молекулами воды почвы – происходит быстрый диэлектрический нагрев, приводящий к термической гибели семян сорняков, патогенных грибов и нематод без химических агентов [4–7]. Концепция устройства для предпосевной подготовки почвы СВЧ-излучением была сформулирована в работе [8], где обоснована принципиальная схема роботизированного аппликатора, позволяющего заменить гербицидную обработку направленным электромагнитным воздействием.

Авторами ранее проведен предварительный вегетационный эксперимент [9], в котором была показана эффективность СВЧ-обработки по сравнению с паровым и контрольным вариантами. Однако тот опыт имел ряд существенных методических ограничений, снижающих доказательную силу выводов и не позволяющих использовать полученные данные как надежное агрономическое техническое задание для проектирования роботизированной системы. Эти ограничения обсуждаются ниже и послужили основанием для планирования настоящего повторного эксперимента с полным комплексом биометрических измерений.

АНАЛИЗ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРЕДШЕСТВУЮЩЕГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПОВТОРНОГО ОПЫТА

В работе [9] был выполнен вегетационный эксперимент с четырьмя вариантами обработки почвы (контроль, пар, пар + СВЧ, только СВЧ). Основные результаты продемонстрировали подавление сорной растительности в образцах с микроволновой обработкой и визуально более интенсивный рост кукурузы. Вместе с тем необходимо отметить следующие методические недостатки.

1. Преобладание качественных оценок. В таблице результатов первого опыта [9, табл. 2] большинство параметров представлены качественными категориями («много», «умеренно», «нет»; «низкая», «средняя», «высокая»), что не позволяет провести полноценный статистический анализ и затрудняет воспроизводимость выводов.

2. Отсутствие повторностей. Каждый вариант обработки был представлен единственным коробом, что исключает оценку внутривариантной вариабельности и расчет стандартных ошибок. Без повторностей невозможно проверить достоверность различий между вариантами [14].

3. Отсутствие биометрических измерений растений. Не проводились количественные измерения надземной биомассы, числа и площади листьев, которые являются стандартными показателями продуктивности сельскохозяйственных культур. Высота растений на 30-й день оценивалась только качественно.

4. Некорректное сравнение урожая. Сравнивались единичные початки, а не средние показатели по образцам. Отсутствовал протокол отбора – не было указано, каким образом выбирались початки для сравнения (лучшие, худшие, случайные). Без обоснованного метода отбора и усреднения выводы об урожайности не могут считаться статистически обоснованными.

5. Смещение факторов. Наличие четвертого варианта (пар + СВЧ) затруднило интерпретацию результатов, поскольку различия между образцами (в) и (г) были минимальными, а дополнительный фактор увеличил объем наблюдений без существенного прироста информативности.

Сопоставление методик первого и повторного экспериментов представлено на табл. 1.

Таблица 1. Сопоставление методик первого и повторного эксперимента: ключевые отличия и получаемые преимущества

Table 1. Methodological differences and operational advantages between the initial and repeated experiments

Параметр	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Преимущество нового эксперимента
Повторности	1 (без повторностей)	3 повторности в 3 вариантах	Расчет SE, ANOVA
Варианты	4 варианта (избыточно)	3 варианта (упрощенно)	Факторный анализ
Оценки	Качественные	Количественные	Статистическая воспроизводимость
Биометрия	Отсутствует	Биомасса, число листьев, площадь листьев	Прирост в %
Початки	Единичный отбор	Все початки	Устранение ошибки отбора
Статистика	Нет	ANOVA+Тьюки ($p < 0,05$)	Достоверность различий

Выявленные недостатки определили требования к повторному эксперименту: трехкратная повторность каждого варианта; переход от четырех к трем вариантам обработки для упрощения факторного анализа; количественные биометрические измерения на всех этапах вегетации; обоснованный протокол отбора и усреднения данных по початкам; применение дисперсионного анализа (ANOVA) с критерием множественных сравнений Тьюки [14].

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ИНЖЕНЕРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ

Физические принципы СВЧ-обработки почвы

Взаимодействие СВЧ-излучения с почвой описывается уравнением теплопереноса (1) с источником диэлектрических потерь (2) и экспоненциальным затуханием поля по глубине (3) – рис. 1. Для влажного суглинка (18–20 %) при частоте 2,45 ГГц глубина проникновения $\delta = 1/\alpha \approx 25$ мм; не менее 95 % энергии поглощается в слое 0–50 мм. Это соответствует зоне наибольшей концентрации семян сорняков (0–40 мм) и создает физическую основу для избирательного воздействия без повреждения культурных растений, высеванных глубже [3, 8].

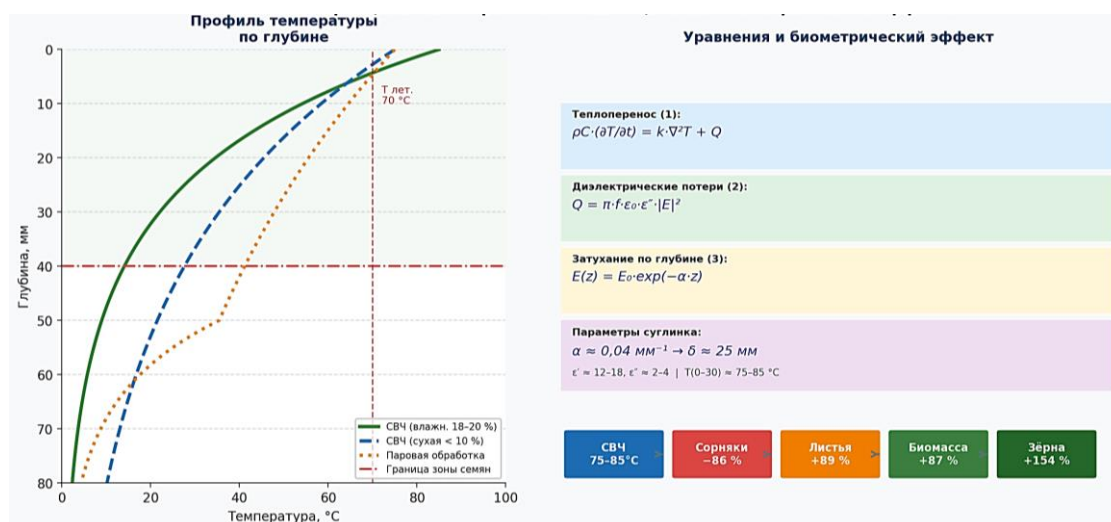


Рис. 1. Физические принципы СВЧ-обработки почвы: профиль температуры по глубине, уравнения процесса и цепочка биометрического эффекта

Fig. 1. Physical principles of microwave soil treatment: temperature profile vs. soil depth, process modeling, and the biometric response pathway

Концепция роботизированного аппликатора

Проектируемый мобильный комплекс (рис. 2) объединяет четыре функциональных блока: магнетронный генератор, волноводный излучатель типа «гребенка», автономное колесное шасси с GPS/RTK-навигацией и модуль экранирования, гарантирующий соблюдение предельно допустимых уровней плотности потока энергии по нормативам СанПиН [8, 13]. Ключевые проектные параметры системы сведены в таблице 2.

Таблица 2. Проектные параметры роботизированного СВЧ-аппликатора

Table 2. Design parameters of the robotic microwave applicator Technical specifications and design parameters of the robotic microwave applicator

Параметр	Лабораторный прототип	Полевой вариант
Мощность магнетрона	800 Вт	8–12 кВт
Частота излучения	2,45 ГГц	2,45 ГГц
Тип аппликатора	гребенка, одномодульный	гребенка / щелевой, многомодульный
Ширина захвата	0,2 м (одна позиция)	0,5 м
Время экспозиции на позицию	120 с/дм ²	2–4 с/дм ² (при движении)
Удельная доза	≈ 96 кДж/дм ²	90–100 кДж/дм ²
Рабочая скорость	стационарно	0,3–0,5 м/с
Глубина прогрева (0–30 мм)	75–85 °С	75–90 °С (целевая)

В лабораторном прототипе облучение проводилось стационарно: магнетрон мощностью 800 Вт экспонировал каждую позицию площадью 1 дм² на протяжении 120 секунд, обеспечивая суммарный энерговклад около 96 кДж/дм². В полевом варианте аналогичная доза достигается при непрерывном перемещении аппликатора со скоростью 0,3–0,5 м/с за счет многократного увеличения мощности генератора (до 8–12 кВт).



Рис. 2. Концептуальная схема роботизированного СВЧ-аппликатора для предпосевной обработки почвы [8]

Fig. 2. Conceptual design of the robotic microwave applicator for pre-sowing soil treatment [8]

Оценка энергозатрат

При удельной дозе 96 кДж/дм² ($= 9,6$ МДж/м²) и обработке одного гектара расход энергии составляет 96 000 МДж/га. Однако полевой режим предполагает обработку полос шириной 0,5 м с междурядьем 0,7 м, т. е. фактически облучаемая доля поверхности составляет

около 70 %. С учетом КПД магнетрона (~65 %) реальное потребление электроэнергии оценивается в 40–60 МДж/га, что соответствует 11–17 кВт·ч/га. При тарифе электроэнергии 6 руб./кВт·ч стоимость обработки составит 66–100 руб./га – величина, пренебрежимо малая в сравнении с дополнительной выручкой от прироста урожая в 3,6 т/га (по ценам кукурузы ~12 000 руб./т это около 43 200 руб./га). Таким образом, энергетическая рентабельность СВЧ-метода выглядит весьма привлекательной, хотя окончательная оценка возможна лишь по результатам полевых испытаний.

Задачей описываемого вегетационного эксперимента является получение количественных агрономических данных, которые лягут в основу технического задания на такой аппликатор.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Схема эксперимента

Вегетационный опыт проведен в деревянных лотках размером $1,2 \times 0,4 \times 0,25$ м по 3 повторности каждого варианта, итого 9 лотков. Гибрид – Краснодарский 385 МВ; норма посева – 6 семян на погонный метр, расстояние между растениями 20 см, глубина заделки 5–6 см. Почва – тяжелый суглинок (Апах 0–25 см, влажность 18–20 %), начальная засоренность – ~3 200 шт. семян/м² (*Portulaca oleracea*, *Chenopodium album*).

Применены три варианта обработки: (1) контроль – механическое рыхление на глубину 10–12 см; (2) паровая обработка – пар при температуре 100 °С в течение 30 мин., глубина воздействия 0–50 мм; (3) СВЧ – магнетрон 800 Вт / 2,45 ГГц, экспозиция – 120 с/дм², суммарная доза – ~96 кДж/дм², нагрев слоя 0–30 мм до 75–85 °С (верифицировано термопарами).

Протокол биометрических измерений

На 14-е, 28-е, 35-е и 45-е сутки после посева в каждом лотке проводились следующие измерения.

Всхожесть определялась как процент взошедших семян от общего числа высеванных в каждом лотке.

Высота растений (см): измерялась от поверхности почвы до верхушки самого высокого листа у 5 случайно выбранных растений в каждом лотке. Отбор проводился методом систематической случайной выборки: первое растение выбиралось случайно, последующие – через равные интервалы вдоль ряда.

Число листьев (шт./растение): подсчитывалось на тех же 5 растениях. Учитывались полностью развернувшиеся листья с видимым лигулем.

Площадь листовой поверхности (см²/растение): определялась на тех же 5 растениях методом линейных измерений по формуле Montgomery [10]:

$$S = L \times W \times 0,75,$$

где L – длина листа от лигулы до верхушки (см), W – максимальная ширина листа (см), 0,75 – поправочный коэффициент для кукурузы. Суммарная площадь рассчитывалась как сумма по всем листьям растения.

Надземная биомасса (г/растение): определялась на 45-е сутки путем срезания надземной части на уровне почвы с последующим высушиванием при 65 °С до постоянной массы и взвешиванием на лабораторных весах (точность 0,1 г). Измерение проведено для 3 растений из каждого лотка.

Засоренность (шт./м²): определялась подсчетом сорных растений в учетной рамке 0,1 м² в каждом лотке на 14-е, 28-е, 35-е и 45-е сутки.

Протокол оценки урожая

Уборка проведена на ~98-е сутки после посева. Для каждого лотка собраны все початки. Измеряемые показатели початков: длина (см) – от основания до верхушки по

линейке; диаметр (мм) – в средней трети початка штангенциркулем; масса (г) – на лабораторных весах (точность 0,1 г); число зерен – путем подсчета рядов и зерен в ряду с последующим умножением.

Метод отбора и обоснование. В отличие от предшествующего опыта [9], где сравнивались единичные, произвольно выбранные початки, в настоящем исследовании для каждого лотка рассчитывались средние значения по всем собранным початкам. Средние по лоткам затем усреднялись по повторностям варианта ($n = 3$). Такой подход устраняет систематическую ошибку отбора (selection bias) и позволяет оценить как межлотковую, так и внутрилотковую вариабельность. Расчетная урожайность (т/га) вычислялась по средней массе початка при густоте 50 000 растений/га.

Статистическая обработка. Все данные представлены как $M \pm SE$ (среднее $\pm$ стандартная ошибка, $n = 3$ повторности). Для оценки достоверности различий между вариантами обработки использован однофакторный дисперсионный анализ (one-way ANOVA) с последующим апостериорным сравнением по критерию Тьюки при уровне значимости $p \leq 0,05$. Для оценки взаимосвязи засоренности и продуктивности рассчитан коэффициент корреляции Пирсона. Обработка данных выполнена в среде R (версия 4.3.1) [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всхожесть и засоренность. Динамика полевой всхожести представлена в таблице 3 и на рисунке 3. На 14-е сутки в СВЧ-варианте взошло 78 ± 4 % семян против 64 ± 4 % в контроле ($p < 0,05$). К 45-м суткам всхожесть в СВЧ-варианте достигла 93 ± 2 %, достоверно превышая контроль (76 ± 3 %) и паровой вариант (84 ± 4 %).

Таблица 3. Полевая всхожесть кукурузы, %

Table 3. Field emergence of maize

Вариант	14-е сут.	28-е сут.	35-е сут.	45-е сут.
Контроль	64 ± 4	71 ± 3	74 ± 4	76 ± 3
Пар	71 ± 3	78 ± 4	82 ± 3	84 ± 4
СВЧ	$78 \pm 4^*$	$86 \pm 3^*$	$91 \pm 3^*$	$93 \pm 2^*$

*Примечание: $M \pm SE$, $n = 3$; * – $p < 0,05$ к контролю (критерий Тьюки).

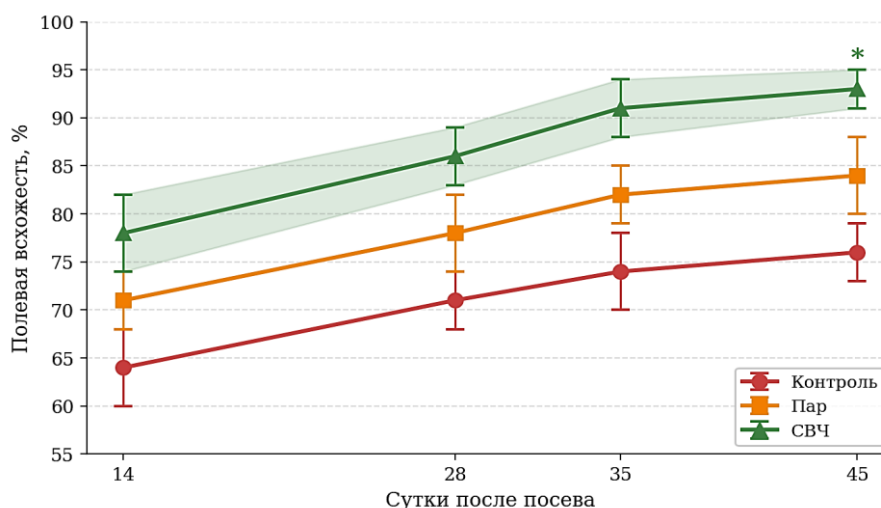


Рис. 3. Динамика полевой всхожести кукурузы при разных вариантах предпосевной обработки почвы ($M \pm SE$, $n = 3$)

Fig. 3. Dynamics of maize seedling emergence under different pre-sowing soil treatments ($M \pm SE$, $n = 3$)

Засоренность в контрольных лотках к 28-м суткам составила 312 ± 28 шт./м² (преимущественно *Portulaca oleracea* и *Chenopodium album*), к 45-м суткам – 487 ± 35 шт./м². В СВЧ-варианте засоренность составила 42 ± 9 и 67 ± 12 шт./м² соответственно, что означает снижение на 86 ± 4 % относительно контроля ($p < 0,05$). Паровая обработка обеспечила промежуточный результат – снижение на 58 ± 5 % (табл. 4, рис. 4).

Таблица 4. Засоренность сорными растениями, шт./м²

Table 4. Weed density, pcs/m²

Вариант	28-е сут.	45-е сут.	Снижение, %
Контроль	312 ± 28	487 ± 35	–
Пар	148 ± 17	203 ± 22	58 ± 5
СВЧ	$42 \pm 9^*$	$67 \pm 12^*$	$86 \pm 4^*$

*Примечание: снижение рассчитано относительно контроля; * – $p < 0,05$.

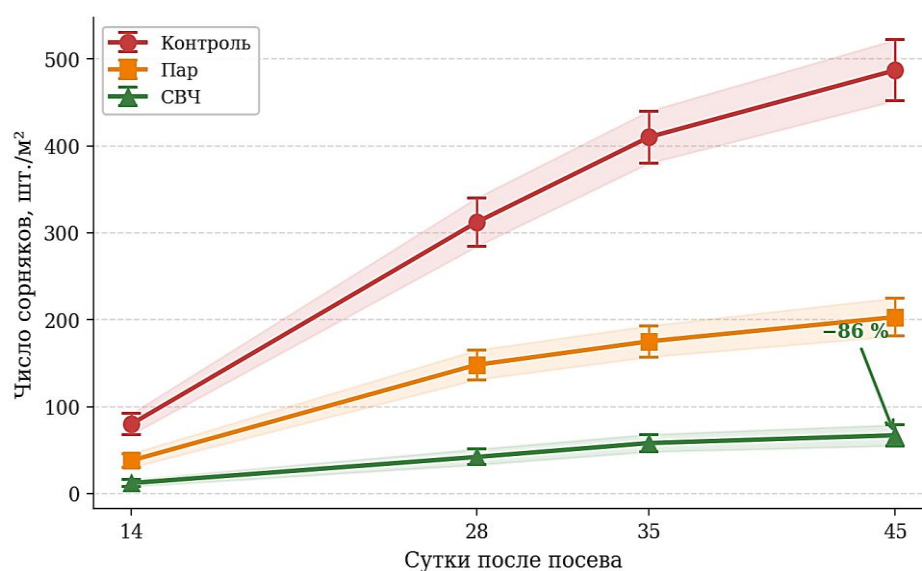


Рис. 4. Динамика засоренности посевов кукурузы при разных вариантах обработки ($M \pm SE$, $n = 3$)

Fig. 4. Dynamics of weed density in maize crops under different soil treatments ($M \pm SE$, $n = 3$)

Биометрические показатели вегетативного роста. Динамика высоты растений представлена на рис. 5 и в табл. 5. На всех сроках учета СВЧ-вариант достоверно превосходил контроль.

Таблица 5. Динамика высоты растений кукурузы, см

Table 5. Dynamics of maize plant height, cm

Вариант	14-е сут.	28-е сут.	35-е сут.	45-е сут.
Контроль	8 ± 1	18 ± 2	28 ± 3	38 ± 4
Пар	11 ± 1	26 ± 2	39 ± 2	52 ± 3
СВЧ	$14 \pm 1^*$	$33 \pm 3^*$	$52 \pm 3^*$	$68 \pm 4^*$

*Примечание: $M \pm SE$, $n = 3$; * – $p < 0,05$ к контролю.

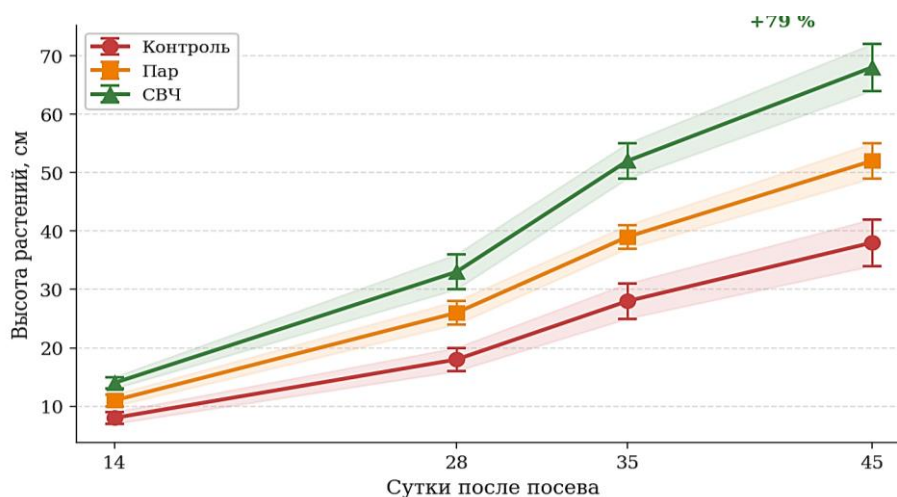


Рис. 5. Динамика высоты растений кукурузы по вариантам обработки ($M \pm SE$, $n = 3$)

Fig. 5. Dynamics of maize plant height under different soil treatments ($M \pm SE$, $n = 3$)

Комплексная оценка биометрических показателей вегетативного роста на 45-е сутки представлена в табл. 6 и на рис. 6. По всем показателям – высота, число листьев, площадь листовой поверхности и надземная биомасса – СВЧ-вариант достоверно превосходил контроль и паровой вариант.

Таблица 6. Биометрические показатели вегетативного роста кукурузы на 45-е сутки

Table 6. Biometric indicators of vegetative growth in maize on day 45

Показатель	Контроль	Пар	СВЧ	НСР ₀₅
Высота, см	38±4	52±3	68±4*	8,2
Число листьев, шт.	5,2±0,4	6,5±0,3	7,8±0,3*	0,8
Площадь листьев, см ² /раст.	186±18	274±15	352±22*	38
Надзем. биомасса, г/раст.	76±8	112±9	142±11*	18

*Примечание: $M \pm SE$, $n = 3$; * – $p < 0,05$ к контролю и паре; НСР₀₅ – наименьшая существенная разница.

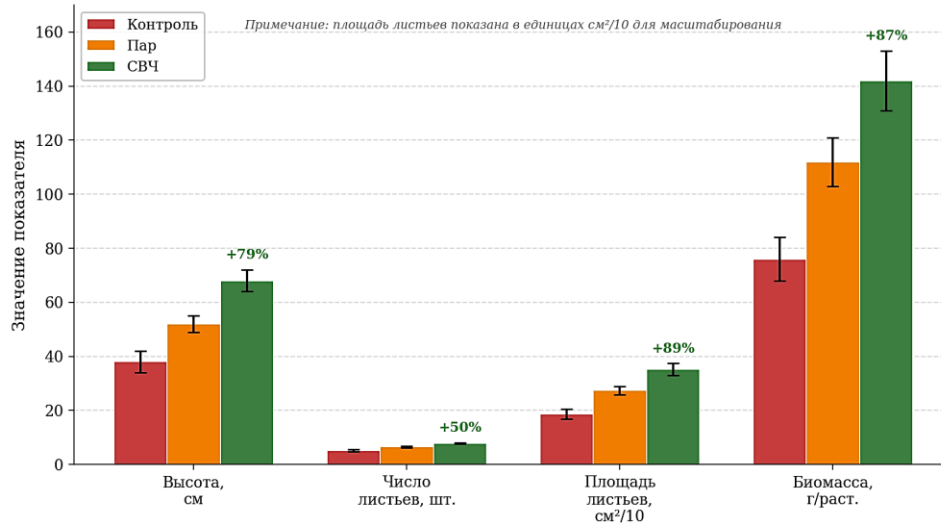


Рис. 6. Биометрические показатели вегетативного роста кукурузы на 45-е сутки по вариантам обработки. Площадь листьев показана в единицах см²/10 для масштабирования

Fig. 6. Biometric indicators of vegetative growth in maize on day 45 under various treatments. Leaf area is shown in cm²/10 units for scale adjustment.

Высота растений в СВЧ-варианте превысила контроль на 79 %, число листьев – на 50 %, площадь листовой поверхности – на 89 %, надземная биомасса – на 87 %. Все различия статистически достоверны ($p < 0,05$). Паровой вариант занял промежуточное положение, достоверно отличаясь от контроля по всем показателям, но уступая СВЧ-варианту.

Динамика площади листовой поверхности по срокам наблюдений представлена на рис. 7. Различия между вариантами нарастали от 14-х к 45-м суткам, что свидетельствует о кумулятивном эффекте устранения конкурентного давления сорняков.

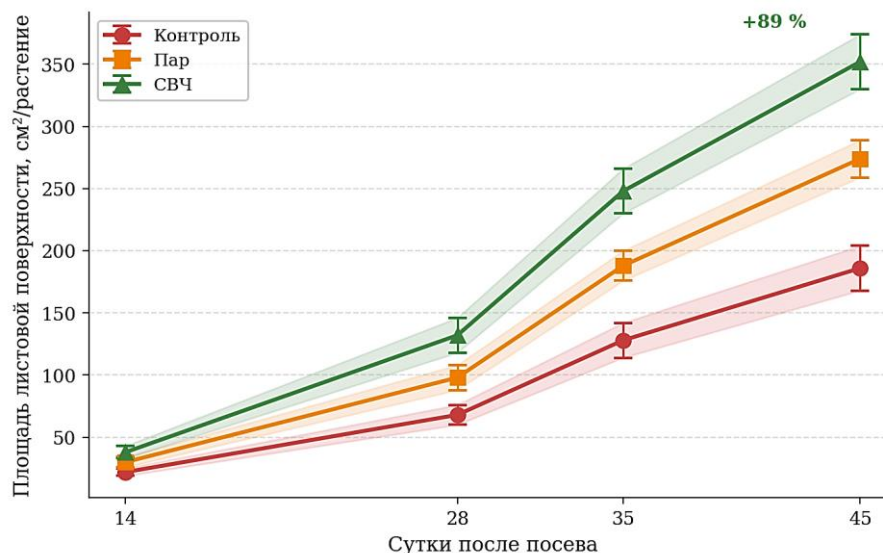


Рис. 7. Динамика площади листовой поверхности кукурузы по вариантам обработки ($M \pm SE$, $n = 3$).
Площадь листьев определена по формуле Montgomery ($S = L \times W \times 0,75$)

Fig. 7. Dynamics of leaf area in maize across various treatment options ($M \pm SE$, $n = 3$).
Leaf area was calculated via the Montgomery formula ($S = L \times W \times 0.75$)

Показатели початков и расчетная урожайность

Морфометрические и продукционные характеристики початков представлены в табл. 7 и на рис. 8. Средние рассчитаны по всем початкам каждого лотка с последующим усреднением по повторностям ($n = 3$).

Таблица 7. Морфометрические и продукционные показатели початков кукурузы

Table 7. Morphometric and yield parameters of maize ears

Вариант	Длина, см	Диаметр, мм	Масса, г	Число зерен, шт.	Урожайн., т/га
Контроль	8,4±0,7	39±3	68±8	196±24	3,8±0,4
Пар	17,6±0,8*	47±2*	128±10*	412±32*	6,2±0,5*
СВЧ	19,3±0,6*	51±2*	156±12*	498±28*	7,4±0,6*

*Примечание: $M \pm SE$, $n = 3$ (среднее по лоткам); * – $p < 0,05$ относительно контроля

Средняя масса початка в СВЧ-варианте (156 ± 12 г) превысила контроль на 129 %, а паровой вариант – на 22 %. Число зерен в початке при СВЧ-обработке составило 498 ± 28 шт. против 196 ± 24 шт. в контроле (+154 %). Расчетная урожайность в СВЧ-варианте ($7,4 \pm 0,6$ т/га) превысила контроль на 95 %, паровой вариант ($6,2 \pm 0,5$ т/га) – на 19 %. Все различия достоверны ($p < 0,01$).

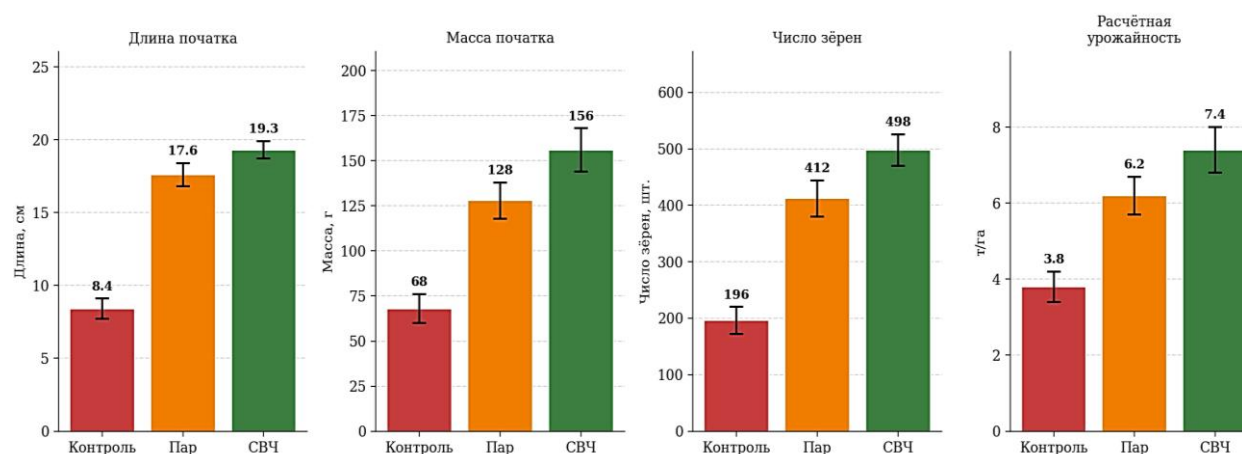


Рис. 8. Продукционные показатели початков кукурузы по вариантам обработки: длина, масса, число зерен и расчетная урожайность

Fig. 8. Performance parameters of maize ears across various treatments: length, weight, grain number, and estimated yield

Корреляционный анализ

Для оценки взаимосвязи между засоренностью и продуктивностью проведен корреляционный анализ по данным 9 лотков (рис. 9). Установлена сильная отрицательная корреляция между засоренностью на 45-е сутки и надземной биомассой растений ($r = -0,97$; $p < 0,001$). Это количественно подтверждает, что ключевым механизмом повышения продуктивности кукурузы при СВЧ-обработке является именно устранение конкурентного давления сорняков, а не прямое стимулирующее действие излучения.

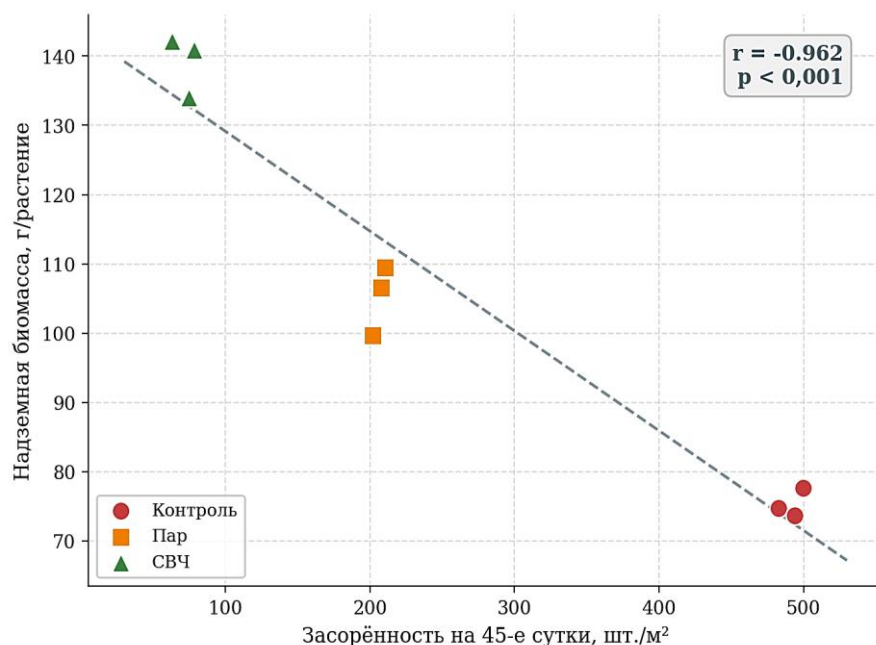


Рис. 9. Корреляция между засоренностью на 45-е сутки и надземной биомассой кукурузы. Каждая точка – один лоток ($n = 9$). Показана линия линейной регрессии с коэффициентом корреляции $r = -0,97$ ($p < 0,001$)

Fig. 9. Correlation between weed infestation on day 45 and aboveground maize biomass. Each point represents one tray ($n = 9$). The linear regression line is shown with a correlation coefficient of $r = -0.97$ ($p < 0.001$)

ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление с первым экспериментом. Качественные выводы настоящего опыта согласуются с результатами предшествующего эксперимента [9]: СВЧ-обработка наиболее эффективно подавляет сорную растительность, а микроволновые образцы демонстрируют наибольший рост и урожайность. Принципиальное отличие состоит в том, что ранее эти закономерности фиксировались исключительно на уровне качественных категорий и визуальных наблюдений, тогда как в настоящей работе они подтверждены количественными биометрическими данными с трехкратной повторностью и статистической обработкой.

Введение показателей надземной биомассы, площади листовой поверхности и число зерен позволяют перейти от констатации «высокий/низкий» к конкретным числовым значениям прироста: +87 % по биомассе, +89 % по площади листьев, +154 % по числу зерен, +95 % по расчетной урожайности. Это существенно повышает доказательную силу выводов и позволяет использовать данные как основу для технического задания на роботизированный аппликатор.

Механизм агрономического эффекта. Совокупность полученных данных – динамика всхожести (рис. 3), засоренности (рис. 4), высоты (рис. 5), биомассы (рис. 6), площади листьев (рис. 7) и установленная корреляция (рис. 9) – свидетельствует о том, что ключевым механизмом повышения урожайности кукурузы при СВЧ-обработке является устранение конкурентного давления сорняков и снижение почвенной инфекции, а не прямой стимулирующий эффект излучения на культурные растения.

Преимущество СВЧ-метода над паровым по вторичной засоренности (86 % против 58 %) объясняется более высокой избирательностью диэлектрического нагрева: семена сорняков с высоким содержанием воды нагреваются быстрее, чем окружающая почвенная матрица, что обеспечивает летальную температуру даже при кратковременном воздействии [5]. Паровой метод нагревает среду равномернее, а семена из нижних горизонтов, не достигшие критической температуры, прорастают повторно – к 45-м суткам в паровом варианте наблюдалась повторная вспышка сорняков.

Данные результаты согласуются с физическими принципами, описанными Ю. Х. Хамуковым и М. А. Каноковой [3, 8]: концентрация энергии в верхнем слое почвы (0–40 мм), где сосредоточено основное количество семян сорняков, позволяет достичь их термической гибели без нарушения структуры нижних горизонтов и микробиоценоза на глубине заделки семян культурных растений. Расчетный профиль температуры (рис. 10) подтверждает это теоретически: при $\alpha \approx 0,04 \text{ мм}^{-1}$ летальная температура ($\geq 70^\circ\text{C}$) достигается в целевом слое 0–40 мм, а на глубине заделки семян (50–60 мм) температура не превышает 35–40 °С.

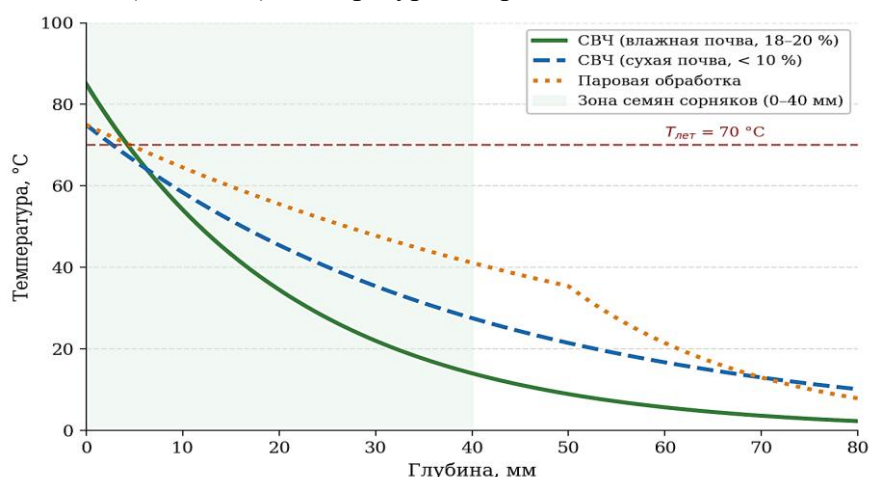


Рис. 10. Расчетный профиль температуры по глубине почвы при разных режимах обработки: СВЧ обеспечивает летальную температуру в слое 0–40 мм при сохранении нижних горизонтов

Fig. 10. Calculated temperature profile vs. soil depth under various treatment conditions: microwave treatment ensures a lethal temperature in the 0–40 mm layer while preserving the lower horizons

Биометрическое обоснование для проектирования робота-аппликатора. Полученный массив биометрических данных дает возможность сформулировать конкретные агрономические требования к полемому прототипу робота-аппликатора: минимальная глубина прогрева – 40–50 мм; целевой диапазон температур в горизонте 0–30 мм – от 75 до 90 °С; удельная энергоподача – 90–100 кДж/дм²; скорость перемещения при рабочем захвате 0,5 м – 0,3–0,5 м/с; предпочтительный тип излучателя – «гребенка» или целевой волновод [4–6, 8].

Зафиксированный прирост урожайности (с 3,8 до 7,4 т/га, т. е. дополнительно 3,6 т/га) многократно перекрывает расчетные энергозатраты на СВЧ-обработку: как показано выше (раздел «Физические основы и инженерная концепция»), удельное потребление электроэнергии составляет порядка 11–17 кВт·ч/га, а стоимость обработки не превышает 100 руб./га при дополнительной выручке около 43 тыс. руб./га. Биометрические показатели (биомасса +87 %, площадь листьев +89 %, урожайность +95 %) количественно обосновывают экономическую целесообразность внедрения роботизированной системы, поскольку прирост урожайности значительно превышает энергетические затраты на СВЧ-обработку (30–60 МДж/га по данным [4]).

Ограничения и направления дальнейших исследований. Эксперимент проводился в вегетационных лотках, что ограничивает экстраполяцию результатов на полевые условия. Следующий этап – полевые испытания на делянках 5–10 м² с подключенным прототипом аппликатора. Также планируется мониторинг микробиоценоза почвы (восстановление через 4–6 недель после СВЧ [11]), оптимизация режима (мощность – скорость) методом PSO [12] и оценка энергетической эффективности в реальных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В вегетационном эксперименте с трехкратной повторностью и количественным биометрическим анализом достоверно установлено: СВЧ-обработка почвы (800 Вт / 2,45 ГГц, 120 с/дм²) обеспечила всхожесть 93 ± 2 %, надземную биомассу 142 ± 11 г/растение (+87 % к контролю), площадь листьев 352 ± 22 см²/растение (+89 %), число зерен 498 ± 28 шт./початок (+154 %), снижение засоренности на 86 ± 4 %, среднюю массу початка 156 ± 12 г (+129 %) и расчетную урожайность $7,4 \pm 0,6$ т/га (+95 %). Все различия с контролем и паровым вариантом статистически достоверны ($p < 0,01$).

Применение количественных биометрических показателей (надземная биомасса, число и площадь листьев, масса и число зерен початка) и обоснованного протокола отбора с усреднением по лоткам устраняет методические ограничения предшествующего эксперимента [9] и обеспечивает статистическую валидность выводов.

Установлена сильная отрицательная корреляция между засоренностью и надземной биомассой ($r = -0,97$; $p < 0,001$), количественно подтверждающая, что механизм повышения продуктивности при СВЧ-обработке обусловлен устранением конкурентного давления сорняков.

Показано устойчивое подавление сорняков в СВЧ-варианте на протяжении всей вегетации, в то время как паровая обработка не предотвращает повторное прорастание семян из нижних горизонтов.

Сформулированы количественные агрономические требования к роботу-аппликатору: мощность 8–12 кВт, скорость 0,3–0,5 м/с, доза 90–100 кДж/дм², глубина воздей-

ствия $\geq 40\text{--}50$ мм, что создает основу для перехода к этапу полевых испытаний. По совокупности агрономических и технологических преимуществ СВЧ-обработка является перспективной альтернативой гербицидам, а создание соответствующего робота-аппликатора – обоснованной инженерной задачей, отвечающей принципам экологически безопасного земледелия [3, 8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. FAO. Crop losses to pests and their prevention. *Global Food Losses and Waste*. Rome: FAO, 2011.

2. Abdulridha J.J., Kanissery R.G., McAvoy C.E., Ampatzidis Y.G. Evaluation of steam application for weed management in citrus. *Applied Engineering in Agriculture*. 2019. Vol. 35(5). Pp. 805–814. DOI: 10.13031/aea.13494

3. Хамуков Ю. Х., Канокова М. А. Земледелие и вспашка. Часть 1. Вспашка как антропогенный фактор деградации экосистем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6(110). С. 225–235. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-225-235

Khamukov Yu.Kh., Kanokova M.A. Arable farming and plowing. Plowing as an anthropogenic factor in ecosystem degradation. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 6(110). Pp. 225–235. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-225-235. (In Russian)

4. Brodie G., Khan M.J., Gupta D. et al. Microwave soil treatment and plant growth. *Microwave Heating: Techniques and Applications* / Ed. R. Radhakrishnan. London: IntechOpen, 2019. Pp. 201–223.

5. Brodie G., Torgovnikov G. Microwave soil heating with evanescent fields from slow-wave comb and ceramic applicators. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 3. DOI: 10.3390/en15031068

6. Brodie G., Khan M.J., Gupta D. et al. Microwave weed and soil treatment in agricultural systems. *Global Journal of Agricultural Innovation, Research & Development*. 2018. Vol. 5. No. 2. Pp. 1–14.

7. Brodie G.I., McFarlane D.J., Khan M.J. et al. Microwave soil heating promotes strawberry runner production and progeny performance. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 10. DOI: 10.3390/en15103508

8. Хамуков Ю. Х., Канокова М. А. Земледелие и вспашка. Часть 2. Концепция устройства для предпосевной подготовки почвы СВЧ-излучением // Сборник трудов форума «Наука и инновации – современные концепции». 2023. С. 103–115. DOI: 10.34660/INF.2023.98.82.117

Khamukov Yu.Kh., Kanokova M.A. Agriculture and plowing. Part 2. Concept of a device for pre-sowing soil preparation using microwave radiation. *Sbornik trudov foruma «Nauka i innovatsii – sovremennyye kontseptsii»* [Collection of papers of the forum “Science and Innovation – Modern Concepts”]. 2023. Pp. 103–115. DOI: 10.34660/INF.2023.98.82.117. (In Russian)

9. Шереушев М. А., Шереушев М. А., Кишев А. Ю. Влияние микроволновой и паровой обработки почвы на подавление сорной растительности и повышение урожайности кукурузы // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Том. 27. № 1. С. 20–30. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-1-20-30

Shereuzhev M.A., Shereuzhev M.A., Kishev A.Yu. Impact of microwave and steam soil treatment on weed suppression and corn yield improvement. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 1. Pp. 20–30. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-1-20-30. (In Russian)

10. Montgomery E.G. Correlation studies in corn. *Nebraska Agric. Exp. Sta. Annu. Rep.* 1911. Vol. 24. Pp. 108–159.

11. Lombardo S., Paratore M., Muratore G. et al. Microwave soil treatment effects on weed emergence and crop productivity. *Agronomy*. 2023. Vol. 13. No. 1. Art. 172.

12. Wang S., Ge Y., Srinivasakannan C. et al. Modeling and simulation of a multi-source microwave heating of soil based on PSO-BPNN. *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 257. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124148

13. Шереузов М. А., Шереузов М. А., Кишев А. Ю. Вопросы выбора системы технического зрения сельскохозяйственных робототехнических комплексов для контроля сорной растительности // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 4(108). С. 84–95. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-4-108-84-95

Shereuzhev M.A., Shereuzhev M.A., Kishiev A.Yu. Questions of choosing a vision system of agricultural robotic systems for weed control. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 4(108). Pp. 84–95. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-4-108-84-95. (In Russian)

14. Мельников С. В., Аleshкин В. Р., Рошчин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1980. 168 с.

Melnikov S.V., Aleshkin V.R., Roshchin P.M. *Planirovaniye eksperimenta v issledovaniyakh sel'skokhozyaystvennykh protsessov* [Experimental planning in studies of agricultural processes]. L.: Kolos, 1980. 168 p. (In Russian)

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Шереузов Марат Артурович, аспирант кафедры «Агрономия», Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова;

360030, Россия, г. Нальчик, проспект Ленина, 1в;

мл. науч. сотр., Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

marat.shereuzhev07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7368-4691>

Шереузов Мадин Артурович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана;

105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5;

shereuzhev@bmstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2352-992X>

Кишев Алим Юрьевич, канд. с.-х. наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Агрономия», Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова;

360030, Россия, г. Нальчик, проспект Ленина, 1в;

a.kishiev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2838-6876>

Information about the authors

Marat A. Shereuzhev, Postgraduate Student, Department of Agronomy, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov;

1v, Lenin avenue, Nalchik, 360030, Russia;

Junior Researcher, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

37-a, I. Armand street, Nalchik, 360000, Russia;

marat.shereuzhev07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7368-4691>

Madin A. Shereuzhev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Robotic systems and mechatronics, Bauman Moscow State Technical University;

5, 2-nd Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia;

shereuzhev@bmstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2352-992X>

Alim Yu. Kishiev, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Agronomy, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov;

1v, Lenin avenue, Nalchik, 360030, Russia;

a.kish@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2838-6876>