Исследовательская статья

https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-57-68

Влияние концентрации углекислого газа, кислотности и электропроводности на продуктивность томата в условиях гидропоники Чеченской Республики

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:
Патимат Магомедовна Ахмедова
E-mail: apm64@mail.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Исаева П.М., Ахмедова П.М. Влияние концентрации углекислого газа, кислотности и электропроводности на продуктивность томата в условиях гидропоники Чеченской Республики. *Аграрный вестник Северного Кавказа*. 2026;16(2):57-68. https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-57-68 EDN NROLAX

ПОСТУПИЛА: 06.03.2026
ДОРАБОТАНА: 05.05.2026
ПРИНЯТА: 28.05.2026

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

COPYRIGHT: © 2026 Исаева П.М., Ахмедова П.М.

П.М. Исаева [1], П.М. Ахмедова [2]

[1] Чеченский государственный университет им. А. А. Кадырова, Грозный, Россия

[2] Федеральный аграрный научный центр Республики Дагестан, Махачкала, Россия

АННОТАЦИЯ

ВВЕДЕНИЕ. Для повышения продуктивности томата в гидропонной культуре важна точная регуляция углекислого газа (CO_2), кислотности (pH) и электропроводности (EC), однако их совместное действие в сочетании с различными субстратами в условиях Чеченской Республики остается недостаточно изученным.

ЦЕЛЬ. Оценить влияние концентрации CO_2, значений pH и EC питательного раствора на урожайность и агробиологические показатели гибридов томата Мерлис F_1 и Сантиана F_1 при гидропонном выращивании на субстратах GRODAN и BIOGROW.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Исследования проведены в тепличном комплексе ООО ТК «ЮгАгроХолдинг» (г. Грозный). Изучали четыре уровня CO_2: 400 ppm (контроль), 850, 1200 и 1500 ppm. В опыте контролировали pH в диапазоне 5,0–6,5 и EC 1,5–4,5 мСм/см при досветке 18 000 лк и фотопериоде 16 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Установлено, что повышение CO_2 до 850–1500 ppm, поддержание pH на уровне 5,5–6,5 и EC 3,2–3,6 мСм/см способствуют увеличению урожайности обоих гибридов. Субстрат BIOGROW обеспечивал более высокие показатели по сравнению с GRODAN.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Наибольшая продуктивность томата достигается при сочетании повышенной концентрации CO_2, оптимальных значений pH и EC, а также использовании органического субстрата BIOGROW. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования технологий тепличного производства томатов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: томат, гидропоника, углекислый газ, pH, электропроводность, субстрат, урожайность

Research article

https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-57-68

Effect of carbon dioxide concentration, pH, and electrical conductivity on tomato yield in hydroponics of the Chechen Republic

CORRESPONDENCE:
Patimat M. Akhmedova
E-mail: apm64@mail.ru

FOR CITATION:
Isaeva P.M., Akhmedova P.M. Effect of carbon dioxide concentration, pH, and electrical conductivity on tomato yield in hydroponics of the Chechen Republic. *Agrarian Bulletin of the North Caucasus*. 2026;16(2):57-68. (In Russ.) https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-57-68

RECEIVED: 06.03.2026
REVISED: 05.05.2026
ACCEPTED: 28.05.2026

DECLARATION OF COMPETING INTEREST:
none declared.

COPYRIGHT: © 2026 Isaeva P.M., Akhmedova P.M.

Petmat M. Isaeva [1], Patimat M. Akhmedova [2]

[1] A. A. Kadyrov Chechen State University, Russia

[2] Federal Agrarian Research Center of the Republic of Dagestan, Makhachkala, Russia

ABSTRACT

INTRODUCTION. To increase tomato productivity in hydroponic cultivation, precise regulation of carbon dioxide (CO_2), acidity (pH), and electrical conductivity (EC) is essential. However, their combined effects in combination with different substrates under the conditions of the Chechen Republic remain insufficiently studied.

AIM. To evaluate the effect of CO_2 concentration, pH, and EC of the nutrient solution on the yield and agrobiological parameters of Merlis F_1 and Santiana F_1 tomato hybrids grown hydroponically on GRODAN and BIOGROW substrates.

MATERIALS AND METHODS. The research was conducted in the greenhouse complex of YugAgroHolding LLC (Grozny). Four CO_2 levels were studied: 400 ppm (control), 850, 1200, and 1500 ppm. The experiment controlled pH in the range of 5.0–6.5 and EC of 1.5–4.5 mS/cm under supplemental lighting of 18,000 lx and a photoperiod of 16 h.

RESULTS. It was found that increasing CO_2 to 850–1500 ppm, maintaining pH at 5.5–6.5, and EC at 3.2–3.6 mS/cm contribute to increased yield of both hybrids. The BIOGROW substrate provided higher performance compared to GRODAN.

CONCLUSION. The highest tomato productivity is achieved by combining elevated CO_2 concentration, optimal pH and EC values, and the use of the organic substrate BIOGROW. The obtained results can be used to improve greenhouse tomato production technologies.

KEYWORDS: tomato, hydroponics, carbon dioxide, pH, electrical conductivity, substrate, yield

ВВЕДЕНИЕ

Развитие гидропонных тепличных комплексов в Чеченской Республике отвечает современным трендам агропромышленного сектора. Технология обеспечивает полный контроль над условиями выращивания: от состава питательного раствора до микроклимата, что гарантирует стабильные урожаи высокого качества. Благодаря исключению почвы из производственного цикла удается полностью контролировать питание растений, минимизировать потери воды и удобрений, а также предотвратить накопление патогенов в субстрате. Природные преимущества региона — длительный вегетационный период и мягкая зима — создают идеальные условия для круглогодичной эксплуатации гидропонных установок. Данное преимущество формирует экономическую привлекательность выращивания овощей в регионе по сравнению с территориями с суровым климатом.

Томат является одной из главных овощных культур в Чеченской Республике. Овощ выращивают как в больших агрохозяйствах, так и на частных огородах. Развитие промышленного производства томатов способствует обеспечению продовольственной безопасности региона, созданию рабочих мест в сельской местности и развитию перерабатывающей промышленности (строительство консервных заводов) [1] [1]. Подтверждением активного внедрения современных технологий служит тепличный комплекс ООО «ТК ЮгАгроХолдинг» (окрестности Грозного), где ежегодно производят около 6 тысяч тонн томатов с применением автоматизированных систем управления микроклиматом, биозащиты и опыления шмелями. Благодаря этому предприятие получает продукцию высокого качества, востребованную по всей России.

Для дальнейшего повышения эффективности тепличного производства необходим переход на более точные методы управления условиями выращивания. Томат — одна из ключевых овощных культур, широко распространенная в мировом тепличном производстве. Эта культура является основным источником фитонутриентов [2]. Тепличная технология — это гибкое решение для устойчивого круглогодичного выращивания томатов, особенно в регионах с неблагоприятными климатическими условиями или ограниченными земельными участками и ресурсами. Точное знание потребностей растений на разных стадиях роста и при различных условиях освещения может способствовать разработке стратегий адаптивного управления для более экономичного и конкурентоспособного производства [3].

Тепличное производство томатов требует многих экологических, технологических и биологических методов для оптимизации производства и качества плодов [4]. Гидропоника как метод выращивания растений без почвы позволяет оптимизировать условия питания, контролировать водно-воздушный режим и минимизировать потери ресурсов. Гидропонная система может обеспечить хорошее качество рассады и всхожесть семян [5]. В исследовании Х. Инден и др. [6] говорится, что применение блоков из минеральной ваты и перлита в гидропонных тепличных системах для выращивания томатов способствует увеличению урожайности по сравнению с альтернативными инертными материалами.

Продуктивность томата в таких системах зависит от множества факторов, включая концентрацию углекислого газа (CO_2), параметры питательного раствора (кислотность pH и электропроводность EC) и тип субстрата. Известно, что углекислый газ является ключевым субстратом для фотосинтеза, и его дефицит в закрытом грунте часто ограничивает рост растений [7]. Повышение уровня углекислого газа до 800–1200 ppm усиливает фотосинтез и ускоряет созревание плодов [2]. В исследованиях [8] изучалось совместное влияние повышенного уровня CO_2 (400 и 800 ppm) и разных доз азотных удобрений (100 и 200 мг/кг почвы) на урожайность и качество томатов при различных режимах орошения (от цветения до плодоношения). Результаты показали, что повышенный уровень CO_2 ослабил негативное влияние сокращенного орошения на урожайность, а сочетание сокращенного орошения, повышенного CO_2 и высокого содержания азота улучшило комплексное качество плодов. Исследование [9] рассматривает влияние повышения концентрации CO_2 в атмосфере на урожайность сельскохозяйственных культур, включая томаты. Авторы отмечают, что дополнительное обогащение воздуха углекислым газом может увеличить рост растений в среднем на 20 %, а урожайность — на 25 %. У ряда авторов [10] исследование посвящено изучению вли-

[1] Терекбаев А.А., Адаев Н.Л., Палаева Д.О., Эскиев В.В. Современная технология возделывания томатов открытого грунта в условиях Чеченской Республики : методические рекомендации. Грозный, ЧНИИСХ, 2018. 28 с.

[2] Jones J.B. Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower. 2nd ed. CRC Press, 2016. 368 p.

яния обогащения воздуха CO_2 на рост томатов в субстрате из минеральной ваты (гидропоника) при разных условиях водоснабжения.

Наряду с углекислым газом важнейшими регулируемыми параметрами являются кислотность (pH) и электропроводность (EC) питательного раствора. Оптимальные значения кислотности и электропроводности питательного раствора напрямую влияют на доступность питательных веществ и здоровье корневой системы [3; 4]. Оптимальные значения pH 5,5–6,5 и EC 3,0–3,5 мСм/см обеспечивают доступность питательных веществ и предотвращают токсичность [3]. Тип субстрата определяет водно-воздушный режим, что сказывается на развитии корневой системы и общем состоянии растения. Оптимизация этих параметров позволяет не только увеличить урожайность, но и снизить затраты на удобрения, улучшить качество продукции и сделать технологию более ресурсосберегающей [7].

Кроме того, на конечный результат влияют внешние условия и состояние здоровья растений. Уровень радиации, температура, влажность, ветровая и снеговая нагрузки накладывают определенный отпечаток на технологию выращивания томата, чем и обусловливают актуальность проблемы разработки научно обоснованных элементов технологий их производства, обеспечивающих высокую урожайность овощных растений и экологически чистую внесезонную продукцию [11].

Важно также учитывать запросы конечных потребителей. Современные потребители при выборе томатов обращают внимание не только на внешний вид плодов, форму, но и на пищевую ценность, которая с каждым годом приобретает большее значение у потребителей [12; 13]. На качество плодов томата оказывают влияние не только генетические особенности сорта, но и факторы окружающей среды (параметры микроклимата), а также элементы технологии выращивания [14].

Сахара и органические кислоты, которые составляют значительную долю сухого вещества томатов, имеют большее отношение к вкусовым качествам, чем к питательной ценности томатов, причем антиоксиданты томатов играют важную роль в последнем аспекте [15].

Томат обладает огромным потенциалом гетерозиса в отношении скороспелости, общей урожайности, характеристик устойчивости и однородности. Гибриды томатов будут по-прежнему преобладать в сельскохозяйственном производстве с высокими технологическими затратами, где они могут демонстрировать свои преимущества [16]. Основой получения высоких урожаев томата является создание сортов и гибридов, обладающих высокими значениями хозяйственно ценных признаков, способных обеспечить эффективность производства и качество продукции с наименьшими затратами труда. Получение гибридных семян у томата связано с большими затратами ручного труда, что является одной из причин их высокой стоимости [17].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности тепличного производства в Чеченской Республике, где умеренные зимы и продолжительный вегетационный период создают благоприятные предпосылки для круглогодичного выращивания томатов, но без адаптации параметров CO_2, pH, EC и типа субстрата к локальным условиям эти преимущества остаются нереализованными. Хотя интерес к технологиям защищенного грунта продолжает расти, существующие данные фрагментарны и не дают возможности однозначно установить наилучшие сочетания факторов среды для максимальной продуктивности культуры в данном регионе.

Цель исследования — изучить влияние концентрации CO_2, pH и EC питательного раствора, а также типа субстрата на продуктивность томата в гидропонных системах. Задачи**:** 1) оценить эффект различных концентраций CO_2 на рост, развитие и урожайность томата; 2) определить оптимальные диапазоны pH и EC питательного раствора для разных фаз вегетации; 3) сравнить эффективность органических и неорганических субстратов; 4) выявить взаимодействие изучаемых факторов и их комплексное влияние на агробиологический потенциал культуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Место, объект и условия исследования

Экспериментальные исследования проводились в тепличном хозяйстве ООО «ТК ЮгАгроХолдинг», за-

[3] Котов В.П., Адрицкая Н.А., Пуць Н.М. и др. Овощеводство. СПб. : Лань, 2022. 496 с.

нимающем общую площадь 8,99 гектара и расположенном в Чеченской Республике, в городе Грозный, Ленинском районе, в селе Алхан-Чурт, на правом берегу реки Нефтянка. Опыты проводились в лабораторных и полевых условиях.

Схема опытов и факторы:

Опыт 1. Гибрид томата (фактор А): Мерлис F_1; Сантиана F_1. Уровни CO_2 (фактор В): 400 ppm (контроль); 850 ppm; 1 200 ppm; 1 500 ppm. Субстрат (фактор С): Grodan (минеральная вата); Biogrow (органический субстрат). Повторность 3-кратная, по 3 растения в делянке. Трехфакторный опыт (гибрид × уровень CO_2 × субстрат). Общее число вариантов: 2 (гибрид) × × 4 (CO_2) × 2 (субстрат) = 16 вариантов. Контроль: вариант с гибридом Мерлис F_1 на субстрате Grodan при 400 ppm CO_2 (урожайность 50,2 кг/м²). Условия выращивания (одинаковые для всех вариантов): температура 22±2 °С, влажность 65±5 %, световой день 16 ч, досветка 18 000 люкс, состав питательного раствора N:P:K=18:6:20

Использовались изолированные блоки теплицы для каждого уровня CO_2, чтобы исключить перекрестное влияние концентраций газа.

Опыт 2. Тип субстрата (фактор А): GRODAN (минеральная вата); BIOGROW (органический субстрат). Параметры питательного раствора (фактор В): pH 5,56 (GRODAN), 5,60 (BIOGROW); EC 3,6 мСм/см (GRODAN), 3,2 мСм/см (BIOGROW). Повторность 3-кратная, по 3 растения в делянке.

Методы измерений и учетные показатели

Этапы развития: рассадный период, цветение 1–3 кисти, 3–5 кистей, 5–10 кистей. Параметры контроля: pH (5,0–6,5), EC (1,5–4,5 мСм/см). Минеральные субстраты были изготовлены из каменной ваты компании GRODAN (Нидерланды), а органические — из кокосового волокна BIOGROW (Франция). Для эксперимента использовались гибриды томатов Мерлис F_1 и Сантиана F_1. Исследования проводились в период с 2019 по 2022 год в условиях продленного оборота. Агротехнические мероприятия включали посадку рассады в конце января, когда ее возраст составлял 45–50 дней, и плотность посадки составляла 2,5 растения на квадратный метр. Условия выращивания: температура: 22±2 С°; влажность: 65±5 %; световой день: 16 ч; состав раствора: N:P:K = 18:6:20; досветка: 18 000 лк. Для измерения pH и электрической проводимости (EC) в ООО «ТК ЮгАгроХолдинг» использовались приборы немецкого производства фирмы STEP GmbH: портативный кондуктометр ECO EC и портативный pH-метр ECO pH. Эти устройства оснащены многофункциональными дисплеями.

Тепличный комбинат ООО «ТК ЮгАгроХолдинг» оснащен полностью автоматизированными системами климат-контроля «Sercom», которые управляют следующими параметрами:

1. Питание растений.
2. Влажностный режим и защита от перегрева.
3. Тепловой и световой режимы в дневное и ночное время.
4. Подача диоксида углерода (CO_2).
5. Измерение и регулирование температуры и влажности воздуха.

Исследования проводились в соответствии с «Методическими рекомендациями по проведению опытов с овощными культурами в сооружениях защищенного грунта» [4] и Методики полевого опыта в овощеводстве [5, 6].

В теплице применяется малообъемная технология выращивания овощей на различных субстратах. Учетные показатели: урожайность (кг/м²); среднесуточный рост (см/сутки); число плодов на растение; средняя масса плода (г); коэффициент эффективности (кг/м² на ед. EC). Статистическая обработка: дисперсионный анализ, расчет $НСР_{0,05}$, корреляционный анализ (Statistica 10.0, Microsoft Excel).

Выбор гибридов Мерлис F_1 и Сантиана F_1 для исследований обусловлен их адаптацией к условиям защищенного грунта, высокой урожайностью, устойчивостью к некоторым заболеваниям и пригодностью для продленного оборота. Эти характеристики делают их перспективными для экспериментов в гидропонных системах и при интенсивной досветке. Гибрид Мерлис F_1 предназначен для выращивания в продленном обороте на искусственных субстратах. Это подтверждается его включе-

[4] Методические указания по селекции сортов и гибридов томата для открытого и защищенного грунта. М. : ВНИИССОК, 1986. 64 с.

[5] Литвинов С.С. Методика полевого опыта в овощеводстве. М. : Россельхозакадемия, 2011. 649 с.

[6] Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) : учебник. М. : Агропромиздат, 1985. 351 с.

нием в Госреестр селекционных достижений РФ с рекомендацией для Центрального и Волго-Вятского регионов. Гибрид имеет комплексную устойчивость к ряду заболеваний, включая: высокую устойчивость *(HR)* к мозаике томата *(ToMV:0–2*), бурой пятнистости листьев *(Ff:A–E),* фузариозному увяданию *(Fol:0,1)*, фузариозной гнили корневой шейки и корней *(For),* вертициллезному увяданию *(Va:0/Vd:0)*. Гибрид Сантиана F_1 разработан для выращивания в продленном обороте и на светокультуре. Отличается высокой ранней и общей урожайностью, хорошей товарностью плодов. При выборе этих гибридов для исследований также учитывались их популярность в профессиональном овощеводстве, доступность семян от надежных производителей (De Ruiter Seeds, Rijk Zwaan) и опыт предыдущих успешных культиваций в схожих условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние уровня CO_2 на урожайность

Углекислый газ — один из основных факторов окружающей среды. В окружающем воздухе уровень углекислого газа на сегодняшний день составляет 420 ppm, или 0,042 %. Повышение концентрации углекислого газа в воздухе повышает интенсивность фотосинтеза в 2–3 раза. Дозируя углекислый газ, можно добиться сокращения продолжительности вегетативной фазы развития растений, обеспечивая тем самым получение раннего урожая. Исследования в тепличном комплексе ООО «ТК ЮгАгроХолдинг» показали эффективность повышения уровня углекислого газа в зависимости от субстратов (таблица 1). Эксперимент был проведен при температуре 22±2 °C, влажности 65±5 %, световом дне 16 ч, составе раствора N:P:K=18:6:20.

Экспериментальные данные в таблице отражают влияние уровня CO_2 (400–1 500 ppm) и типа субстрата (Grodan/Biogrow) на урожайность гибридов Мерлис F_1 и Сантиана F_1 при гидропонном выращивании. Для обоих гибридов зафиксировано последовательное повышение урожайности с ростом концентрации CO_2 от 400 до 1 500 ppm. В нашем эксперименте максимальный прирост урожайности относительно контроля отмечен у гибрида Мерлис F_1 — до 24,7 % при 1 500 ppm CO_2, тогда как у Сантианы F_1 прирост составил 20,2 %. Это указывает на генотипическую специфику реакции разных гибридов на изменение концентрации углекислого газа. На всех уровнях CO_2 субстрат Biogrow обеспечивал статистически значимую прибавку урожайности: 6,6–9,0 % для Мерлис F_1 и 6,7–8,7 % для Сантиана F_1 по сравнению с Grodan. Вероятно, это связано с лучшими водно-воздушными свойствами Biogrow, обеспечивающими оптимальный режим влагообеспечения и питания корневой системы.

Таблица 1
Урожайность гибридов томатов Мерлис F_1 и Сантиана в зависимости от субстрата при разном уровне CO_2

Table 1
Yield of tomato hybrids Merlis F_1 and Santiana depending on the substrate at different CO_2 levels

Гибрид томата	Досветка (люкс)	Уровень CO_2 (ppm)	Grodan (кг/м²) ± ± Sx	Biogrow (кг/м²) ± Sx	Прибавка (%)	Прирост к контролю (%)	p значение
Мерлис F_1	18 000	400 (контр.)	50,2± 1,1	53,5 ± 1,3	6,6	0	—
	18 000	850	58,1 ± 1,2	62,4 ± 1,4	7,4	15,7	p < 0,05
	18 000	1200	61,5 ± 1,3	66,7 ± 1,5	8,5	22,9	p < 0,01
	18 000	1500	62,2 ± 1,3	67,8 ± 1,5	9,0	24,7	p < 0,01
Сантиана F_1	18 000	400 (контр.)	55,4 ± 1,2	59,1 ± 1,4	6,7	0	—
	18 000	850	61,9 ± 1,3	67,3 ± 1,5	8,7	11,7	p < 0,05
	18 000	1200	65,6 ± 1,4	71,1 ± 1,6	8,4	18,6	p < 0,01
	18 000	1500	66,4 ± 1,4	71,8 ± 1,6	8,1	20,2	p < 0,01
НСР 0,05			1,50 кг/м²		—		
НСР 0,05 фактор А			0,53		—		
НСР 0,05 фактор В			0,75		—		
НСР 0,05 фактор С			0,53		—		

Значимость различий на уровнях $p < 0,05$ и $p < 0,01$ подтверждает, что наблюдаемые эффекты обусловлены именно варьированием факторов (CO_2, субстрат, гибрид), а не случайными отклонениями. Полученные результаты согласуются с данными других исследований [7; 9], демонстрирующих положительное влияние обогащения воздуха CO_2 на продуктивность томатов в условиях защищенного грунта. Все представленные в таблице приросты урожайности (11,7–24,7 %) превышают НСР, что подтверждает статистическую значимость влияния факторов CO_2 и субстрата на урожайность томатов.

Гибрид (А): влияние значимо ($F = 211,6 > 4,15$). Сантиана F_1 (63,4 кг/м²) достоверно превосходит Мерлис F_1 (58,6 кг/м²) на 4,8 кг/м² (> $НСР_{0,05}$ = 0,53 кг/м²). Уровень CO_2 (В): влияние крайне значимо ($F = 268,8 > 2,90$). Максимальный эффект при 1200–1 500 ppm. Разница между крайними уровнями (400 и 1 500 ppm) составляет 10,0 кг/м² (> $НСР_{0,05}$ = 0,75 кг/м²). Субстрат С: влияние значимо ($F = 270,1 > 4,15$). Biogrow (64,0 кг/м²) дает прибавку 6,1 кг/м² по сравнению с Grodan (57,9 кг/м²) (>$НСР_{0,05}$ = 0,53 кг/м²).

Значимые взаимодействия АВ и ВС указывают на то, что эффект CO_2 различается для гибридов (Мерлис сильнее реагирует на повышение CO_2); влияние субстрата зависит от уровня CO_2. Влияние субстрата не зависит от гибрида (АС): эффект от использования субстратов Grodan и Biogrow проявляется одинаково у обоих гибридов — Мерлис F_1 и Сантиана F_1. То есть прибавка урожайности от Biogrow по сравнению с Grodan примерно одинакова для обоих гибридов (6,6–9,0 % для Мерлиса и 6,7–8,7 % для Сантианы) и не зависит от генотипа растения. Отсутствие тройного взаимодействия (АВС): реакция гибридов на разные уровни CO_2 не меняется в зависимости от типа субстрата. Это означает, что закономерности влияния CO_2 (последовательный рост урожайности с повышением концентрации) наблюдаются одинаково на обоих субстратах; эффективность субстрата Biogrow сохраняется при всех уровнях CO_2 как для Мерлиса F_1, так и для Сантианы F_1; нет особых комбинаций «гибрид + субстрат + CO_2», которые давали бы неожиданный (синергетический или антагонистический) эффект.

Положительная линейная зависимость — $y = 0,0122x + 50,24$, $R^2 = 0,89$ y — прогнозируемая урожайность (кг/м²); x — уровень CO_2 (ppm); 0,0122 — коэффициент регрессии: показывает, что при повышении концентрации CO_2 на 1 ppm урожайность томатов в среднем увеличивается на 0,0122кг/м²; 50,24 — свободный член уравнения (точка пересечения с осью Y). Уравнение показывает, что урожайность томатов линейно растет с повышением концентрации CO_2 в диапазоне, изученном в эксперименте (400–1500 ppm). Значение $R^2 = 0,89$ свидетельствует о сильной связи между уровнем CO_2 и урожайностью. Прирост CO_2 на каждые 100 ppm дает прибавку урожайности около 1,22 кг/м². Значимость фактора CO_2 ($F = 268,8 > F$-критического 2,90) в таблице 2 подтверждает, что влияние CO_2 на урожайность достоверно и не случайно.

Рисунок 1 наглядно демонстрирует зависимость урожайности гибридов томатов Мерлис F_1 и Сантиана F_1 от уровня концентрации CO_2 при выращивании в условиях гидропоники с досветкой 18 000 люкс.

Таблица 2
Математическая обработка 3-факторного дисперсионного анализа (гибрид × уровень CO_2 × субстрат)

Table 2
Mathematical processing of three-way analysis of variance (hybrid × CO_2 level × substrate)

Источник вариации	Степени свободы (*df*)	Сумма квадратов (*SS*)	Средний квадрат (*MS*)	*F*-наблюдаемое	*F*-критическое (0,05)	Значимость
Гибрид (А)	1	172,8	172,8	211,6	4,15	Значим
CO_2 (В)	3	658,2	219,4	268,8	2,90	Значим
Субстрат (С)	1	220,5	220,5	270,1	4,15	Значим
АВ (взаимодействие)	3	12,6	4,2	5,1	2,90	Значим
АС (взаимодействие)	1	0,9	0,9	1,1	4,15	Не значим
ВС (взаимодействие)	3	8,4	2,8	3,4	2,90	Значим
АВС (взаимодействие)	3	2,1	0,7	0,86	2,90	Не значим
Ошибка	32	26,1	0,816	—	—	—
Общая	47	1 091,6	—	—	—	—

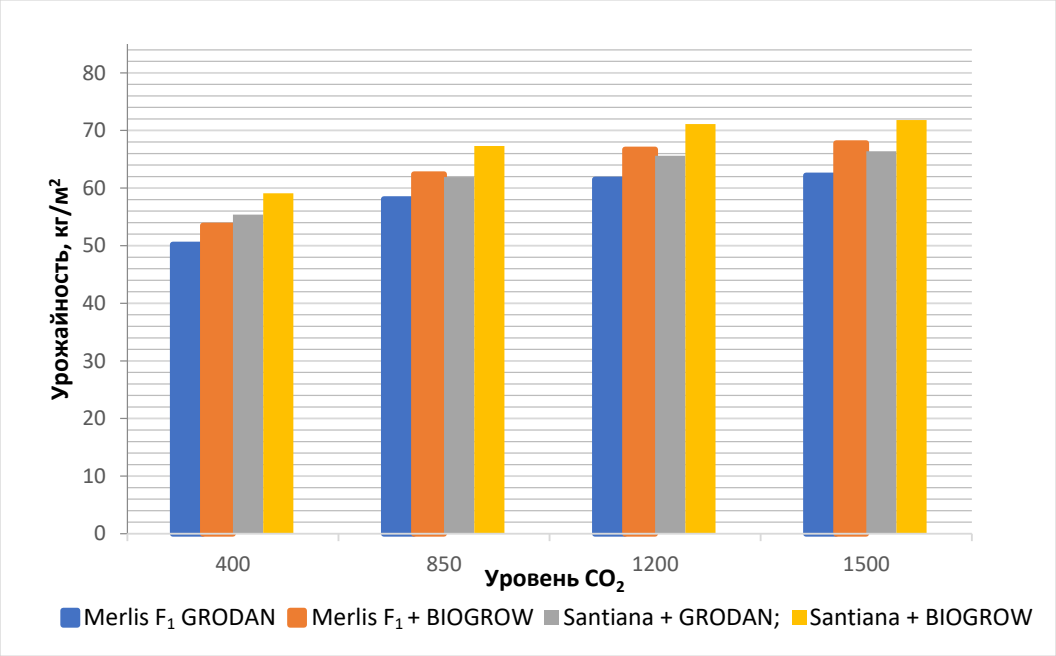


Рисунок 1
Влияние уровня концентрации CO_2 на урожайность

Figure 1
Effect of CO_2 concentration level on yield

Полученные данные подтверждают целесообразность применения контролируемого обогащения CO_2 в тепличных комплексах для повышения эффективности гидропонного выращивания томатов.

Влияние типа субстрата на урожайность

Для оптимального управления подачей питательных веществ в субстратах необходимо учитывать химический состав субстратного раствора, концентрацию и взаимное соотношение ионов в подаваемом питательном растворе и дренаже, уровень воды и влажность, pH, EC (электропроводность), температуру, свет (лучистая энергия и досветка), объем и форму субстрата, плотность корневой системы и т. д.

В таблице 3 представлены результаты экспериментального изучения влияния двух субстратов (GRODAN и BIOGROW) на агробиологические показатели томата гибрида Мерлис F_1 в условиях гидропоники при интенсивной досветке (18 000 лк). Эти показатели представляют собой усредненные значения 2019–2022 гг. выращивания (в нашем случае — за продленный оборот) в питательном растворе.

Субстрат BIOGROW демонстрирует превосходство над GRODAN по всем ключевым показателям: урожайность выше на 6,3; число плодов — на 7,1; масса плода — на 2,4; коэффициент эффективности — на 9,3 %. Среднесуточный линейный рост (см/сутки) — индикатор скорости вегетации. Увеличение на 3,2 % для BIOGROW согласуется с приростом урожайности, указывая на стимулирование ростовых процессов.

Число плодов/растение и средняя масса плода (г) — компоненты структуры урожая. BIOGROW обеспечивает как большее количество плодов (на 7,1 %), так и их повышенную массу (на 2,4 %), что объясняет суммарный прирост продуктивности. Коэффициент эффективности (кг/м² на ед. EC) — расчетный показатель, отражающий отдачу на единицу минерального питания. Значение 19,36 для BIOGROW против 16,69 для GRODAN свидетельствует о более рациональном использовании питательных веществ.

Физико-химические параметры корневой зоны (pH, EC) остаются в допустимых пределах, исключая токсическое воздействие солей или дисбаланс кислотности. Увеличение урожайности обусловлено как количественным (больше плодов), так и качественным (большая масса плода) факторами. BIOGROW обеспечивает более рациональное использование минеральных веществ, что важно для снижения затрат на удобрения.

Эти результаты согласуются с выводами исследований по субстратам [5; 6], где субстраты на основе органических компонентов также показали повышенную эффективность по сравнению с минеральной ватой за счет лучшей аэрации и влагоемкости. В работах по морфологии корневой системы [11] отмечено, что субстраты с высокой пористостью стимулируют развитие корневой системы, что косвенно влияет на поглощение питательных веществ и, как следствие, на продуктивность растений.

Оптимальные параметры pH и EC

В рамках исследования мы придерживались рецептуры минерального питания томата, разработанной с учетом фаз развития растения. Основой для нашей работы послужили исследования М. П. Ладогина [18] и публикации А. Б. Хорошкина, Д. В. Юнга [19]. Авторы акцентируют внимание на необходимости корректировки состава питательных растворов в зависимости от фазы развития растения, что позволяет оптимизировать урожайность и качество продукции. Мы адаптировали предложенные рекомендации с учетом конкретных условий нашего эксперимента (тип субстрата, система полива, климатические условия), что позволило достичь стабильных результатов в выращивании томата в защищенном грунте. Данные исследования выявили оптимальные значения pH и EC на разных этапах развития растений (таблица 4).

Оптимальные значения EC в растворах должны повышаться на разных этапах роста растений (таблица 5). Оптимальный уровень pH при разных этапах развития в растворах составляет 5,5; в матах значение pH должно повышаться до 5,5–6,5.

Таблица 3
Урожайность томата Мерлис F_1 в зависимости от pH и EC субстрата с досветкой 18 000лк

Table 3
Yield of tomato Merlis F_1 depending on substrate pH and EC under supplemental lighting of 18,000 lx

Субстрат	pH	EC (мСм /см)	Урожайность (кг/м²) ± S_x	Среднесуточный рост (см/сутки) ± S_x	Число плодов/ растение	Средняя масса плода (г)	Прибавка к GRODAN (%)	Коэффициент эффективности (кг/м² на ед. EC)
GRODAN	5,56	3,6	60,1 ± 1,2	3,09 ± 0,05	28 ± 1	125 ± 3	—	16,69
BIOGROW	5,60	3,3	63,9 ± 1,1	3,19 ± 0,04	30 ± 1	128 ± 3	6,32	19,36

Таблица 4
Значения pH и EC на этапах выращивания растений томата в рассадной

Table 4
pH and EC values at tomato seedling stage

Этап выращивания	pH	EC мСм/см²
Пропитка кубиков	5,0	1,5
Период прорастания	5,0	1,5
Появление всходов	5,5	2,0
10–21-е сутки (до высадки на произв. площадь)	5,5–5,7	3,0
Пропитка матов до высадки растений	5,5	2,5
Полив	5,7	2,5–2,7

Таблица 5
Оптимальные pH и EC в разные периоды роста томатов

Table 5
Optimal pH and EC values during different tomato growth periods

Показатели	В растворах				В матах
	Рассадной	Цветение			
		1–3 кисти	3–5 кисти	5–10 кисти	
pH	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5–6,5
EC	1,8	2,3	3,0–3,2	3,0–3,6	до 4,5

Оптимальные значения EC в растворах должны повышаться на разных этапах роста растений: в период цветения 1–3 кисти 2,3 мСм, в период цветения 3–5 кисти и 5–10 кисти повышается до 3–3,6 мСм. В матах показатель EC должен быть до 4,5 мСм. Увеличение концентрации солей в растворе замедляет поступление воды в корни. Но нехватка некоторых элементов, например бора или марганца, может привести к отравлению корней.

Недостаток или избыток питания растений может быть обусловлен не только их количеством, но и возможным проявлением антагонизма и синергизма при их поглощении из почвы и усвоении из удобрений. В итоге это отражается на питании культур, урожайности и качестве [20].

Полученные диапазоны pH (5,5–6,5) и EC (1,8–4,5 мСм/см) согласуются с рекомендациями [4] для гидропонного выращивания томатов. В частности, авторы [3] подчеркивают, что поддержание pH в диапазоне 5,8–6,2 обеспечивает максимальную доступность фосфора и микроэлементов. В работе Н. А. Адаева, П. М. Исаева, А. Г. Амаева [7] показано, что превышение EC выше 4,0 мСм/см на поздних стадиях развития может вызвать осмотический стресс, что подтверждается нашими данными: при EC > 4,5 мСм/см наблюдалось снижение темпов роста и качества плодов. Таким образом, комплексное управление уровнем CO_2, выбором субстрата и контролем pH/EC позволяет существенно повысить урожайность томатов в условиях защищенного грунта. Наибольший эффект достигается при сочетании повышенного содержания CO_2 (850–1500 ppm), использования субстрата BIOGROW и строгого соблюдения оптимальных параметров питательного раствора на каждом этапе развития растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили комплексно оценить влияние CO_2, типа субстрата, pH и EC на продуктивность томата в условиях гидропоники Чеченской Республики. Установлено, что повышение концентрации углекислого газа до 850–1500 ppm, поддержание pH в диапазоне 5,5–6,5 и EC 3,2–3,6 мСм/см достоверно увеличивают урожайность гибридов Мерлис F_1 и Сантиана F_1. Гибрид Мерлис F_1 показал более высокую отзывчивость на обогащение CO_2, что свидетельствует о генотипической специфике. Органический субстрат BIOGROW превосходит минеральный GRODAN по урожайности и эффективности использования питательных веществ благодаря лучшим водно-воздушным свойствам. Наибольшая продуктивность достигнута при сочетании повышенного CO_2, субстрата BIOGROW и фазовой корректировки pH и EC. Полученные результаты могут быть масштабированы в тепличных хозяйствах для повышения рентабельности и снижения ресурсозатрат.

Вклад авторов

П. М. Исаева: проведение исследования, формальный анализ, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

П. М. Ахмедова: разработка концепции, разработка методологии, административное руководство исследовательским проектом, научное руководство, написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Contributions

P. M. Isaeva: investigation, formal analysis, validation, visualization, writing-original draft.

P. M. Akhmedova: conceptualization, methodology, project administration, supervision, writing-review & editing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Магомадов А.С., Оказова З.П., Магомадов С.А. Применение регуляторов роста на основе гуминовых веществ для возделывания томатов в условиях открытого грунта лесостепи Чеченской Республики. *Международный сельскохозяйственный журнал.* 2026;1:45-50. https://doi.org/10.55186/25876740_2026_69_1_88
Magomadov A.S., Okazova Z.P., Magomadov S.A. Application of growth regulators based on humic substances for cultivation of tomatoes in open-ground conditions of the forest-steppe of the Chechen Republic. *International Agricultural Journal.* 2026;1:45-50. (In Russ.) https://doi.org/10.55186/25876740_2026_69_1_88

2. Mauro R.P., Rizzo V., Leonardi C. et al. Influence of harvest stage and rootstock genotype on compositional and sensory profile of the elongated tomato cv. “Sir Elyan.”. *Agriculture.* 2020;10(3)82. https://doi.org/10.3390/agriculture10030082
3. Shamshiri R.R., Jones J.W., Thorp K.R. et al. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *International Agrophysics*. 2018;32(2):287-302. https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005
4. Franco J.L., Rodriguez N., Diaz M. et al. Influence of different pruning methods in cherry tomato grown hydroponically in a cropping spring cycle: effects on the production and quality. *International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics.* 2008;843:165-170. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.843.20
5. Mehwish L., Arshad M.M., Muhammad I. et al. Evaluation of Growth Parameters and Germination Behaviour of Different Tomato (Lycopersicon esculentum Mill.) Cultivars under Hydroponic Condition. *Pakistan Journal of Agricultural Research.* 2020;33(3):1-6. https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2020/33.3.544.549
6. Inden H., Torres A. Comparison of four substrates on the growth and quality of tomatoes. *International Symposium on Growing Media and Hydroponics.* 2004;644:205-210. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.644.27
7. Адаев Н.Л., Исаева П.М., Амаева А.Г. Влияние уровня углекислого газа на урожайность томатов в условиях гидропоники. *Особенности развития сельского хозяйства в Российской Федерации : материалы Всероссийской научно-практической конференции.* Грозный, 21 октября 2022 года. Грозный : Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова. 2022.103-108. https://doi.org/10.36684/81-2022-1-103-108

   Adaev N.L., Isaeva P.M., Amaeva A.G. The effect of carbon dioxide levels on tomato yields under hydroponic conditions. *Features of agricultural development in the Russian Federation : proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference.* Grozny, October 21, 2022. Grozny : Akhmat Abdulhamidovich Kadyrov Chechen State University. 2022.103-108. (In Russ.) https://doi.org/10.36684/81-2022-1-103-108
8. Wey Z., Du T., Li X. et al. Interactive effects of elevated CO_2 and N fertilization on yield and quality of tomato grown under reduced irrigation regimes. *Frontiers in Plant Science.* 2018;9:328. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00328.
9. Idso C.D., Idso K.E. Forecasting world food supplies: the impact of the rising atmospheric CO_2 concentration. *Technology.* 2000;7(S)33-56. https://doi.org/10.18522/2308-9709-2013-5-14
10. Akhlaq M., Zhang C., Yan H. et al. Response of tomato growth to continuous elevated CO2 concentration under controlled environment. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering (IJABE).* 2022;15(6):51-59. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20221506.7418
11. Ахмедова П.М. Оценка новых гибридов томата в защищенном грунте. *Вестник российской сельскохозяйственной науки.* 2021;1:37-41. https://doi.org/10.30850/vrsn/2021/1/37-41

    Akhmedova P.M. Assessment of new tomatoes hybrids in a covered crop. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2021;1:37-41. (In Russ.) https://doi.org/10.30850/vrsn/2021/1/37-41
12. Causse M., Buret M., Robini K. et al. Inheritance of nutritional and sensory quality traits in fresh market tomato and relation to consumer preferences. *Journal of Food Science*. 2003;68(7):2342-2350. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb05770.x
13. Wang F., Kang S., Du T. et al. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments. *Agricultural Water Management*. 2011;98(8):1228-1238. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.03.004
14. Krumbein A., Schwarz D. Grafting: A possibility to enhance health-promoting and flavour compounds in tomato fruits of shaded plants? *Scientia Horticulturae*. 2013;149:97-107. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.09.003
15. Petrovic I., Savic S., Jovanovic Z. et al. Fruit quality of cherry and large fruited tomato genotypes as influenced by water deficit. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2019;106(2):123-128. https://doi.org/10.13080/z-a.2019.106.016
16. Cheema D.S., Dhaliwal M.S. Hybrid tomato breeding. *Journal of New Seeds*. 2004;6(2-3):1-14. https://doi.org/10.1300/J153v06n02_01

17. Добродькин А.М., Добродькин М.М., Пугачева И.Г. и др. Экономическая эффективность возделывания в открытом и защищенном грунте гибридов томата с повышенной лежкостью плодов. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2023;1:132-136. EDN: ECVOES
Dobrodkin A.M., Dobrodkin M.M., Pugacheva I.G. et al. The economic efficiency of cultivating tomato hybrids with increased fruit shelf life in open and protected soil. *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2023;1:132-136. (In Russ.)
18. Ладогина М.П. О корректировке питательных растворов при выращивании плодоовощных культур на минеральной вате. Гавриш, [gavrishshop.ru];1999
Ladogina M.P. On the correction of nutrient solutions in the cultivation of fruit and vegetable crops on mineral wool. Gavrish, [gavrishshop.ru];1999.
19. Хорошкин А.Б., Юнг Д.В. Обновленная рецептура питания томата и огурца в защищенном грунте. Гавриш, [gavrishshop.ru];2020 URL: https://gavrishshop.ru/articles/novaya-receptura-pitaniya-tomata-i-ogurca-v-zashchishchennom-grunte
Khoroshkin A.B., Jung D.V. Updated nutrition recipe for tomatoes and cucumbers in protected soil. Gavrish, [gavrishshop.ru];2020 URL: https://gavrishshop.ru/articles/novaya-receptura-pitaniya-tomata-i-ogurca-v-zashchishchennom-grunte
20. Bhattacharya D., Ghosh R., Tripathy S. et al. Evaluation of tomato growth, yield, phytochemical properties under varied nutrient regimes in hydroponic system with traditional soil system. *Journal of Plant Nutrition*. 2025;48(17):3043-3061. https://doi.org/10.1080/01904167.2025.2506687

Сведения об авторах

Исаева Петмат Мусаевна —
старший преподаватель, кафедра химии,
Чеченский государственный университет
им. А. А. Кадырова, Грозный, Россия
SPIN-код: 7285-5210
fatima_isaeva74@mail.ru

Ахмедова Патимат Магомедовна —
кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник отдела плодоовощеводства и переработки, Федеральный аграрный научный центр Республики Дагестан, Махачкала, Россия
https://orcid.org/0000-0003-4617-4359
SPIN-код: 7727-4054
apm64@mail.ru

About the authors

Petmat M. Isaeva —
Senior Lecturer, Department of Chemistry,
A. A. Kadyrov Chechen State University, Russia
fatima_isaeva74@mail.ru

Patimat M. Akhmedova —
Cand. Sci. (Agric.), Senior Researcher, Department of fruit and vegetable growing and processing, Federal Agrarian Research Center of the Republic of Dagestan, Makhachkala, Russia
https://orcid.org/0000-0003-4617-4359
apm64@mail.ru