

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского

Биология. Химия. Том 11 (77). 2025. № 2. С. 3–16.

УДК 574.24:579.64

DOI 10.29039/2413-1725-2025-11-2-3-16

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА МИКРООРГАНИЗМОВ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ *SORGHUM BICOLOR* (L.) В АГРОСИСТЕМАХ ПРЯМОГО ПОСЕВА И ТРАДИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Абдурашитова Э. Р., Абдурашитов С. Ф., Паштецкий В. С.

ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма», Симферополь,
Россия

E-mail: elvi-jadore@mail.ru

Оценивали водный статус растений, биологическую активность ризосферы и биомассу семян *Sorghum bicolor* под действием комплекса микроорганизмов (КМ) и агросистем в условиях чернозема южного. В засушливые годы (2018 г., 2020 г.) установлено снижение активности пероксидаз и эмиссии углекислого газа в прямом посеве в сравнении с традиционной системой до 3,9 раз и 1,4 раза соответственно. В среднем за годы исследования биомасса зерна в различных системах земледелия была одинаковой, в то же время применение КМ способствовало ее повышению на 0,07 т/га при традиционной системе и 0,23 т/га при прямом посеве. Корреляционный анализ выявил обратную зависимость между биомассой зерна и активностью пероксидаз ($r = -0,74$ в 2018 г., $r = -0,67$ в 2020 г.), а также сильную отрицательную связь с эмиссией CO_2 ризосферы ($r = -0,88$ в 2020 г.). Таким образом, комбинирование биотехнологических и агротехнологических методов балансирует работу ризосферного микробоценоза и повышает продуктивность сорго в условиях засухи.

Ключевые слова: *Sorghum bicolor* (L.) Moench; прямой посев; водный дефицит; эмиссия углекислого газа; активность пероксидаз; биомасса зерна; корреляция.

ВВЕДЕНИЕ

В мировом земледелии сорго зерновое занимает 70–75 млн га. Среди злаков сорго содержит самое высокое количество фитохимических веществ, включая антоцианы, каротиноиды, фенольные кислоты, конденсированные дубильные вещества и др. [1]. Его зерно идет на производство спирта и спиртосодержащих напитков, в качестве продуктов питания человека и корма для животных и др. [2, 3]. Известно, что из растений сорго выделен биогербицид сорголеон, подавляющий рост сорняков [4], который позволит уменьшить зависимость производителей продовольственных культур от синтетических гербицидов. Сорго обладает высокой засухоустойчивостью, что делает его перспективным для культивирования в степи в условиях зон рискованного аграрного производства.

В то же время выращивание сельскохозяйственных культур требует экологически обоснованного подхода, что обеспечивается применением биотехнологических приемов, способствующих активизации микробиома почвы, оптимизации минерализационных процессов и повышению рентабельности продукции в различных условиях [5–8]. Так, в прикорневой зоне (ризосфере) происходит взаимодействие между растением, почвой и ассоциативными микроорганизмами (PGPR – plant growth promoting microorganisms, ростстимулирующие ризобактерии). Это взаимодействие играет ключевую роль в возникающих связях между ними [9], содействует защите от патогенов, ростстимуляции, повышению устойчивости к аномальным колебаниям температуры [10, 11].

Стресс, вызванный резкими изменениями погодно-климатических условий, важнейший фактор негативного влияния на биохимические процессы в период вегетации растений [12]. Водный статус и его генетическая детерминация у разных генотипов играют особую роль в экстремальных условиях при формировании адаптивных реакций и продуктивности в онтогенезе, что оказывает особое влияние на вегетативное и генеративное размножение растений [13]. Исследована потенциальная роль PGPR в придании устойчивости к водному стрессу [14, 15], в том числе применение арбускулярных микоризных грибов с сорго зерновым [16].

Ранее показано, что применение прямого посева способствуют сохранению агрофизических и биологических свойств почвы. Комплексный подход применения микроорганизмов и прямого посева в земледелии повышает общую биогенность почв [17]. Альтернативное решение применения биопрепаратов вместо химических средств, а прямого посева вместо традиционной системы, дополняют способы по адаптации растений к водному и температурному стрессу. Сигналом стрессоустойчивости почв и растений служит увеличение активности антиоксидантных ферментов [18]. Почвенные ферменты участвуют в многоступенчатых процессах разложения и синтеза органических соединений ароматического ряда, оказывают влияние на рост и поглощение питательных веществ растениями [19].

Цель работы – оценить водный статус растений, биологическую активность ризосферы и биомассу зерна сорго зернового под действием комплекса микроорганизмов и различных агросистем в условиях чернозема южного.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Стационарный эксперимент по исследованию влияния систем земледелия и комплекса микроорганизмов (КМ) на сохранение плодородия пахотных земель заложен в 2015 году на опытном поле ФГБУН «НИИСХ Крыма» (с. Клепинино, 45°31'48.36"N, 34°11'47.88"E) на площади 3,8 га. Почва – чернозем южный мицелярно-карбонатный слабогумусированный, развитый на лессовидных легких глинах [20, 21]. Мощность гумусового горизонта до 40 см, всего гумусового слоя – до 70 см. Количество гумуса (по Тюрину) – 2,4–2,6 %, подвижного фосфора (по Мачигину) – 1–2,5 мг/100 г почвы, подвижного калия – 18–28 мг/100 г почвы. Исследуются традиционная система для условий Крыма (с применением вспашки и

рыхлением почвы до и во время вегетации культур) и ресурсосберегающая (по технологии прямого посева без обработки почвы). Для обеих систем земледелия применяется чередование пяти культур. По условиям стационарного опыта заложен двухфакторный эксперимент: фактор А – агросистема традиционная или ресурсосберегающая, фактор Б – наличие или отсутствие инокуляции комплексом микроорганизмов (КМ); со следующими вариантами: 1. Прямой посев (ПП) без обработки семян КМ; 2. Прямой посев с обработки семян КМ (ПП с КМ); 3. Традиционная система (ТС) без обработки семян КМ; 4. ТС – обработка семян КМ (ТС с КМ). Соответственно факторам опыта и проводилось сравнение. Учетная площадь эксперимента 1,8 га. Полевая повторность трехразовая.

Условия проведения эксперимента

В 2018 году гидротермический коэффициент (ГТК) за вегетационный период (апрель-август) составил 0,65, что соответствует интенсивности засухи – слабая [22]. Зима характеризовалась неустойчивой погодой со значительным недобором осадков и высокой температурой воздуха после зимнего периода. В 2019 году в период вегетации культуры наблюдали благоприятные условия для развития, а ГТК=0,78 – отсутствие засухи. В период активного роста растений июнь–июль осадков выпало выше на 61,0 и 26,2 мм среднемноголетней. В 2020 году погода характеризовалась резкими аномальными отклонениями. В марте наблюдали сухую погоду, количество осадков в 12,9 раза ниже, а температура в 2,6 раза выше среднемноголетних значений. По количеству осадков весна острозасушливая, выпало всего 44 мм, в т.ч. только один хозяйственно-полезный дождь. В этот год ГТК составил 0,59 – засуха средней интенсивности.

Биологические объекты

Сорго зерновое (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) сорта Крымбел (селекция Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского), представляет собой однолетнее самоопыляющееся растение. Комплекс микроорганизмов (КМ) состоит из штаммов Крымской коллекции (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/507484/>): *Paenibacillus polymyxa* П (основная функция защита от фитопатогенов), *Lelliottia nimipressuralis* 32-3 (ростстимуляция и фосфатмобилизация), *Agrobacterium radiobacter* 204 (улучшение азотного питания) и ассоциация грибов арбускулярной микоризы *Rhizophagus* sp. РЗ. Бактерии применяли в предпосевной инокуляции семян из расчета 10^6 КОЕ на семя, а грибы вносили вместе с семенами в почву в количестве 20–30 колонизирующих единиц на семя.

Лабораторные анализы

Отбор проб растений и ризосферы проводили в фазу выметывания (июль, через 2–2,5 месяца поле посева). Растения (n=15 на вариант) выкапывали с земляным комом и переносили в лабораторию для анализа. Пока растения не потеряли тургор, проводили определение водного статуса через определение водного дефицита и относительной тургесцентности согласно методу, описанному в Практикуме под ред. Третьякова Н. Н. [23]. С каждого растения пробочным сверлом диаметром 8 мм

делали по 10 высечек, которые взвешивали на аналитических весах трижды: непосредственно после вырезания (m_i), после насыщения влагой (через 2 часа экспозиции в воде) (m_n), после высушивания для определения абсолютно сухой массы (m_{as}). Расчет водного дефицита проводили по формуле (1)

$$\text{Водный дефицит} = \frac{V_2 - V_1}{V_2} 100, \quad (1)$$

где V_1 – исходное содержание воды в высечках ($m_i - m_{as}$), V_2 – количество воды, насыщающее орган ($m_n - m_i$).

Расчет относительной тургесцентности по формуле (2)

$$\text{Относительная тургесцентность} = \frac{m_i - m_{as}}{m_n - m_{as}} 100, \quad (2)$$

где m_i – исходная масса высечек, m_n – масса высечек после насыщения влагой, m_{as} – абсолютно сухая масса высечек.

Степень относительной засухоустойчивости оценивали по Гончаровой [24] на основе данных о водном дефиците: высокая при водном дефиците до 10 %, средняя – 10–20 %, при 20 % и более – низкая.

За ризосферу принимали кусочки почвы, непосредственно прилегающие к корням размером не более 5 мм, которые использовали свежие, но все результаты пересчитывали на абсолютно сухую почву (а.с.п.). Активность пероксидаз определяли колориметрическим методом [25]. Для этого 50 г ризосферы ($n=3$) заливали 100 мл 0,5 н. раствора нитрата аммония и взбалтывали 30 мин. Суспензию отфильтровали через фильтр с синей лентой. К 10 мл фильтрата (взято 2 аналитические повторности) прилили 1 мл 0,3 % гваякола и 1 мл 0,05 н. H_2O_2 . Реактивы перемешивали и компостировали при 27 °С в течении 1 часа. В результате компостирования раствор изменял цвет на розовый, интенсивность которого детектировали на фотоэлектроколориметре КФК-2 с зеленым светофильтром в кювете 10 мм. Параллельно для построения калибровочного графика оценивали серию разведений нитрата серебра. Активность фермента рассчитывали по формуле (3).

$$\text{Активность пероксидаз} = \frac{C \times 2,53 \times 100}{n}, \quad (3)$$

где C – показатель по калибровочному графику, мг/мл Ag ; n – навеска почвы (а.с.п.), г; 2,53 – пересчет на мкМоль гваякола.

Интенсивность эмиссии CO_2 в ризосфере определяли титриметрическим методом в модификации Макарова [26]. Навеску почвы 5 г ($n=3$) помещали в вialу, которую опускали в другой сосуд, содержащий 20 мл свежеприготовленного раствора 0,1 н. гидроксида натрия. Сосуд герметично закрывали пробкой и компостировали при 27 °С в течении 5 суток. Завершив компостирование, вынимали вialу с почвой, а к раствору, насыщенному углекислым газом, приливали 2 мл 50 % раствора хлорида бария, 2–3 капли 0,1 % спиртового раствора

фенолфталеина. Полученную смесь титровали 0,1 н. раствором соляной кислоты. Холостая проба не содержала почву

$$\text{Эмиссия } CO_2 = \frac{(V_1 - V_2) \cdot 2,2}{n \cdot t}, \quad (4)$$

где V_1 – объем 0,1 Н раствора HCl, израсходованный на титрование холостой пробы, мл.; V_2 – объем кислоты, израсходованный на титрование исследуемой пробы, мл.; n – навеска почвы (а.с.п.), г; t – время экспозиции, сутки.

Биомассу семян учитывали в фазу полной зрелости растений из расчета на 14 % влажность. Сбор семян проводили комбайном Sampo-500 ($n=3$).

Статистический анализ

Полученные данные представлены в виде средней арифметической $\pm$ стандартной ошибки средней ($\bar{x} \pm S\bar{x}$) [27]. В оценке значимости различий по биомассе семян использовали дисперсионный анализ, а именно наименьшую существенную разность двухфакторного эксперимента на 5 % уровне значимости. Для корреляционного анализа использовали программные возможности Statistica 10.0 по протоколу Пирсона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Дефицит влаги отрицательно воздействует на развитие растений, особенно, если это почвенно-воздушная засуха. Оценка результатов исследования сорго зернового за 2018–2020 годы показало, что действие комплекса микроорганизмов на водный дефицит растений проявилось только в 2019 году снижением его на 7,1 % (табл. 1). Также отметили два года подряд (2019–2020 гг.) при традиционной системе показатель уменьшался на 4,1–6,1 %, чем при прямом посеве.

Таблица 1

Уровень водного дефицита растений *S. bicolor* под влиянием агроэкосистем и предпосевной инокуляции семян комплексом микроорганизмов (КМ), (чернозем южный, 2018-2020 гг.)

Вариант опыта	Водный дефицит растений, %		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев	22,2 $\pm$ 0,8	28,9 $\pm$ 1,8	17,4 $\pm$ 1,3
ПП с КМ	24,6 $\pm$ 3,0	21,8 $\pm$ 2,7	16,6 $\pm$ 0,3
Традиционная система	22,2 $\pm$ 2,0	22,8 $\pm$ 3,4	13,3 $\pm$ 1,7
ТС с КМ	25,3 $\pm$ 2,3	26,4 $\pm$ 1,5	14,1 $\pm$ 0,4

Вода составляет 70–95 % от массы растительной клетки. Степень насыщенности ею показывает относительная тургесцентность, которая изменяется в противоположном направлении водному дефициту. При применении комплекса микроорганизмов в 2019 году получили положительный эффект в прямом посеве,

зарегистрировав увеличение относительной тургесцентности листьев сорго на 9,5 % от контроля без инокуляции (табл. 2). Полевой эксперимент показал увеличение насыщенности водой клеток растения при традиционной системе на 4,1–7,3 % по сравнению с системой no-till в условиях 2019 и 2020 гг.

Таблица 2

Относительная тургесцентность растений *S. bicolor* под влиянием агросистем и предпосевной инокуляции семян комплексом микроорганизмов (КМ), (чернозем южный, 2018–2020 гг.)

Вариант опыта	Относительная тургесцентность растений, %		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	77,8±0,8	60,4±2,1	82,6±1,3
ПП с КМ	75,4±3,0	69,9±3,7	83,4±0,3
Традиционная система	77,8±2,0	67,7±4,9	86,7±1,7
ТС с КМ	74,7±2,3	63,4±2,5	85,9±0,4

Согласно показателям водного баланса в растениях возможно сделать вывод о степени засухоустойчивости сорго. По результатам определения водного дефицита установлена низкая степень засухоустойчивости растений в 2018 и 2019 гг., в 2020 г – средняя.

Пероксидаза катализирует окисление органических соединений почвы за счет кислорода перекиси водорода и органических перекисей, и поступает в почву в виде прижизненных выделений корней растений и микроорганизмов. Далее образующиеся соединения взаимодействуют с аминокислотами и пептидами, образуя молекулы гумусовых кислот [19]. В ходе трехлетнего эксперимента выявлено, что активность пероксидаз в ризосфере сорго в условиях системы no-till более стабильна год от года, варьируя в пределах 6,4–17,2 %, а при традиционной системе показано значительное изменение активности до 4,3 раз (табл. 3). Эффект резкого повышения функционирования фермента при традиционной системе в 2020 году по сравнению с предыдущими годами связан с выпадением перед анализом одного хозяйственно-полезного дождя. Это является подтверждением нестабильности ферментативной активности в ризосфере при традиционной агросистеме, сильно зависящей от погодных условий. В то же время применение предпосевной инокуляции семян КМ в основном способствовало снижению активности пероксидазы как при традиционной системе, так и при прямом посеве на 13,8–58,0 %, допуская в некоторые годы для различных систем увеличение показателя. Возможно, это связано с тем, что интродуцированные микроорганизмы восполняют ресурсы минеральных веществ, необходимых как растению, так и другим участникам биохимических процессов в ризосфере за счет альтернативных источников, не используя органические компоненты субстрата, на которые нацелена пероксидаза.

Таблица 3

Влияние предпосевной инокуляции семян сорго зернового комплексом микроорганизмов (КМ), выращенной при различных системах земледелия на активность пероксидаз ризосферы, (чернозем южный, 2018–2020 гг.)

Вариант опыта	Активность пероксидаз, мкмоль $C_7H_8O_2$ /100 г почвы		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев	2,80±0,03	2,99±0,04	2,40±0,04
ПП с КМ	2,32±0,03	1,99±0,04	4,60±0,04
Традиционная система	3,04±0,00	2,17±0,06	9,27±0,04
ТС с КМ	3,30±0,02	1,87±0,01	3,89±0,02

Из литературных данных известно, что дыхание почвы обычно повышается с изменением величины пористости пахотного слоя или в период интенсивного обмена веществ у растений [28]. Также показатели почвенного дыхания на основе эмиссии углекислого газа дают представление об активности почвенных микробиомов и позволяют оценить потери органического вещества вследствие процессов минерализации. Анализ полученных нами данных за 2018–2020 гг. показал снижение эмиссии CO_2 на 9,1–20,7 %, а значит и активности минерализационных процессов, в прямом посеве в ризосфере сорго при применении КМ (табл. 4), что, скорее всего, указывает на получение энергии за счет других источников в данный момент вегетации культуры (фаза выметывания). В традиционной системе выделение углекислого газа изменялось не значительно при сравнении вариантов без обработки и с обработкой КМ, но в течении трех лет проведения эксперимента являлось неустойчивым (диапазон варьирования 8,0–44,6 %) по сравнению с ресурсосберегающей технологией (диапазон 14,6–29,9 %).

Таблица 4

Эмиссия углекислого газа ризосферы *S. bicolor* под влиянием агросистем и комплекса микроорганизмов (КМ), (чернозем южный, 2018-2020 гг.)

Вариант опыта	Эмиссия углекислого газа, мг / г почвы		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев	160,8±8,4	112,8±5,6	137,4±7,6
ПП с КМ	146,2±0,0	89,4±7,4	125,5±4,3
Традиционная система	171,7±0,1	103,4±2,1	186,7±12,9
ТС с КМ	170,9±0,4	118,0±2,2	186,7±7,4

Результирующим показателем изучения эффективности применения различных биотехнологий, в том числе бактеризации, и систем земледелия является продуктивность растений. Биомасса зерна для *S. bicolor* – это основной используемый в народном хозяйстве продукт. Согласно полученным данным масса зерна *S. bicolor* под воздействием исследуемых систем земледелия не различалась

(1,53 т/га в среднем за три года). Значительная прибавка продуктивности культуры 6,9–40,0 % (0,11–0,6 т/га) получена при применении КМ в системе прямого посева в 2018 и 2020 годах, а также в один год (2020) при традиционной технологии выращивания – 15,6 % (0,17 т/га). Это в среднем за три года повысило получаемую продукцию на 15,0 % (0,23 т/га) по ресурсосберегающей технологии и на 4,6 % (0,07 т/га) – по ТС. По биомассе зерна при прямом посеве, как в случае с эмиссией CO₂, так и в случае с активностью пероксидаз, отмечены более стабильные показатели в течении 2018-2020 гг., чем при ТС.

Таблица 5

Биомасса зерна *S. bicolor* под влиянием агросистем и комплекса микроорганизмов (чернозем южный, 2018-2020 гг.)

Вариант опыта	Биомасса зерна, т/га			
	2018 год	2019 год	2020 год	Среднее за 2018–2020 гг.
Прямой посев	1,50	1,50	1,59	1,53
ПП с КМ	2,10	1,47	1,70	1,76
Традиционная система	1,50	2,01	1,09	1,53
ТС с КМ	1,53	2,00	1,26	1,60
<i>НСР₀₅, фактор А, фактор Б</i>	<i>0,30</i>	<i>0,03</i>	<i>0,10</i>	

Примечание: НСР₀₅ – наименьшая существенная разность.

Корреляционный анализ изученных параметров в активную фазу роста растений показал схожие сильные связи между погодно-климатическими условиями 2018 и 2020 годов, характеризующимися повышенным температурным режимом и отсутствием осадков в некоторые критические фазы вегетации сорго зернового. Повышение биомассы зерна отрицательно коррелировало с активностью пероксидаз ризосферы $r = -0,74$ и $r = -0,67$ соответственно в 2018 и 2020 годах (рис. 1).

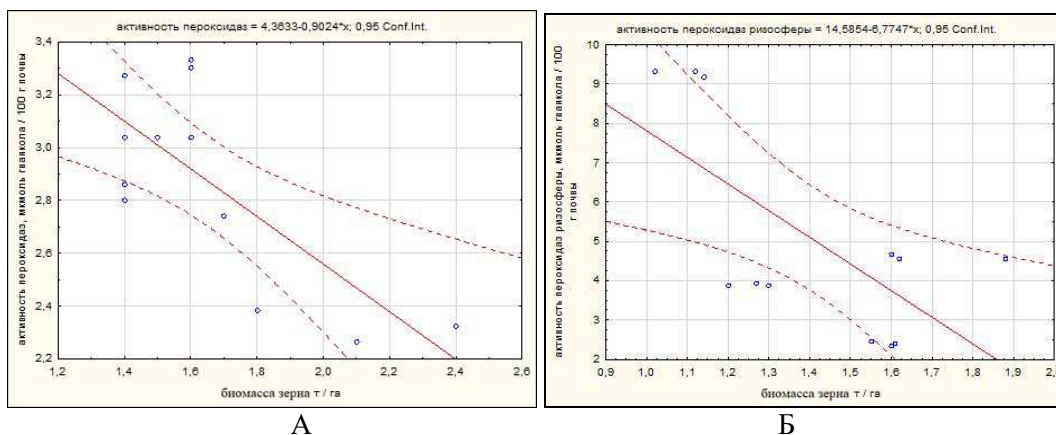


Рис. 1. Диаграмма рассеяния связи активности пероксидаз ризосферы и биомассы зерна сорго зернового в 2018 (А) и 2020 (Б) годах (чернозем южный).

Особенно ярко выражено влияние засухи при традиционном посеве, не смотря на повышенную относительную тургесцентность в этом варианте эксперимента. 2019 год отмечен сменами периодов переувлажнения почвы количеством осадков, превышающих среднегодовые показатели, и периодов с умеренной засухой и не выявил связей изучаемых показателей с урожайностью.

Установлена отрицательная сильная корреляция дыхание почвы с зерновой продуктивностью сорго с $r = -0,88$ в полевом эксперименте 2020 года (рис. 2).

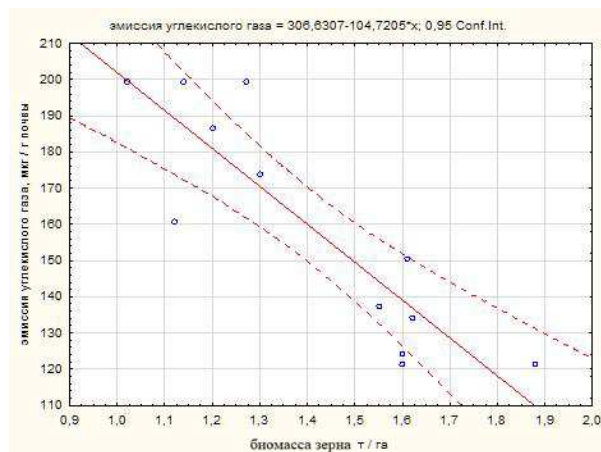


Рис. 2. Диаграмма рассеяния связи эмиссии углекислого газа с биомассой зерна сорго зернового (чернозем южный, 2020 г.)

При регидратации почвы, подвергшейся засухе, минерализуется органическое вещество, что приводит к резкому увеличению бактериальной популяции по сравнению с почвами, которые не были подвержены стрессу [29]. Есть подтверждение, что устойчивые к засухе микроорганизмы секретируют смеси растворенных веществ, например трегалозу, которые используются для защиты как своей клетки от неблагоприятных условий среды [30]. Полученные нами результаты подтверждают приведенные выше литературные данные прямыми корреляционными связями. При прямом посеве установили повышение биомассы зерна в сравнение с традиционной в 2020 году, что, возможно, связано с незначительным количеством выпадения осадков в период активного роста растений, и превышение его в июне месяце, способствовавшее удержанию влаги в ризосфере и активизации некоторых групп микроорганизмов [31] и ферментов. Полученные результаты и сопоставление их с литературными данными свидетельствуют о том, что биоагенты микробных препаратов повышают адаптацию растений сорго при смене длительной засухи к благоприятным погодным условиям или наоборот. Так растения, которые в начале испытывали недостаток воды и ростовые процессы угнетались, после выпадения даже незначительных осадков в течение активной фазы дали прибавку биомассы зерна (2018 и 2020 год).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние КМ на величину относительной тургесцентности и водного статуса в полевом эксперименте отмечено только 2019 г в варианте прямого посева в сторону повышения насыщенности клеток водой и засухоустойчивости растений. Применение КМ способствует оптимизации функциональной деятельности ферментов пероксидаз и эмиссии углекислого газа в ризосфере. В условиях 2018 и 2020 гг. установлено снижение активности пероксидаз и эмиссии углекислого газа в прямом посеве в сравнении с традиционной агросистемой до 3,9 раз и 1,4 раза соответственно. В среднем за годы исследования биомассы зерна в различных системах земледелия была одинаковой, в тоже время применение КМ способствовало ее повышению на 0,07 т/га при традиционной системе и на 0,23 т/га при технологии прямого посева. Установленные корреляционные связи активности пероксидаз ризосферы, эмиссии углекислого газа с биомассой зерна указывают на то, что применение комплекса микроорганизмов содействует оптимизации функционирования аборигенной микрофлоры, что показано результатом их жизнедеятельности (ферментативной активностью) и адаптации растений к засушливым условиям.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0834-2019-0005 «Экологическое обоснование альтернативных способов улучшения плодородия почвы при разных системах земледелия»

Список литературы

1. Mohamed H. I. Sorghum: nutritional factors, bioactive compounds, pharmaceutical and application in food systems: A review / H. I. Mohamed, E. M. Fawzi, A. Basit, R. Kaleemullah Lone [et al.] // *Phyton-International Journal of Experimental Botany*. – 2022. – Vol. 91, No 7. – P. 1303–1325.
2. Зотеев В. С. Зерновое сорго в кормлении лактирующих коров / В. С. Зотеев, Г. А. Симонов, А. К. Антимонов // *Молочное и мясное скотоводство*. – 2018. – № 7. – С. 34–38.
3. Сыркина Л. Ф. Сорго зерновое как возможный источник сырья для переработки на крахмал и спирт / Л. Ф. Сыркина, Ю. Ю. Никонорова // *Вестник КрасГАУ*. – 2020. – № 10(163). – С. 95–100.
4. Uddin M. R. Herbicidal activity of formulated sorgoleone, a natural product of *Sorghum* root exudate / M. R. Uddin, S. U. Park, F. E. Dayan, J. Y. Pyon // *Pest Management Science*. – 2014. – Vol. 70, No 2. – P. 252–257.
5. Shukla S. K. Deep Tillage, Soil Moisture Regime, and Optimizing N Nutrition for Sustaining Soil Health and Sugarcane Yield in Subtropical India / S. K. Shukla, R. L. Yadav, R. Gupta, A. K. Singh, S. K. Awasthi, A. Gaur // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. – 2018. – Vol. 49, No 4. – P. 444–462.
6. Аипова Р. Биологические препараты в органическом земледелии / Р. Аипова, А. Б. Абдыкадырова, А. А. Курманбаев // *Биотехнология и селекция растений*. – 2019. – № 2(4). – С. 36–41.
7. Suman J. Microbiome as a Key Player in Sustainable Agriculture and Human Health / J. Suman, A. Rakshit, S. D. Ogireddy, S. Singh, C. Gupta, J. Chandrakala // *Frontiers in Soil Science*. – 2022. – Vol. 2. – P. 821589.
8. Volobueva O. The influence of biological products and growth regulators on the yield and quality indicators of pea seeds of various varieties / O. Volobueva, I. Seregina, S. Belopukhov, M. Grigoryeva, V. Trukhachev, A. Manokhina, N. Kozlov // *Brazilian Journal of Biology*. – 2024. – Vol. 84. – P. e280312.
9. Venturi V. Signaling in the rhizosphere / V. Venturi, C. Keel // *Trends in Plant Science*. – 2016. – Vol. 21, No 3. – P. 187–198.

10. Андронов Е. Е. Анализ показателей почвенного микробиома в процессах, связанных с почвообразованием, трансформацией органического вещества и тонкой регуляции вегетационных процессов / Е. Е. Андронов, Е. А. Иванова, Е. В. Першина, О. В. Орлова, Ю. В. Круглов, А. А. Белимов, И. А. Тихонович // Бюллетень почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2015. – № 80. – С. 83–93.
11. Дубинина М. Н. Роль почвенных микробиологических сообществ в формировании агрономически ценной водопрочной структуры / М. Н. Дубинина, В. А. Лыхман // Вестник Донского государственного аграрного университета. – 2019. – № 3-1. – С. 82–87.
12. Ха Т. З. Ключевой стимулятор роста растений – ризобактерии / Т. З. Ха, А. В. Канарский, З. А. Канарская [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2020. – № 3(47). – С. 58–73.
13. Черных Е. П. Влияние экологических факторов и периода вегетации на содержание биологически активных веществ в некоторых видах растительного сырья Красноярского края / Е. П. Черных, Л. А. Мильшина, О. В. Гоголева, Г. Г. Первышина // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 11(74). – С. 128–131.
14. Kumar P. G. *In vitro* Screening for Abiotic Stress Tolerance in Potent Biocontrol and Plant Growth Promoting Strains of *Pseudomonas* and *Bacillus* spp. / P. G. Kumar, S. K. Mir Hassan Ahmed, S. Desai, A. E. Leo Daniel, R. Abdul // International Journal of Bacteriology. – 2014. – Vol. 2014. – 6 p.
15. Лебедев В. Н. Оценка эффективности обработки семян капустных культур ассоциативными ризобактериями в условиях нормального увлажнения и почвенной засухи / В. Н. Лебедев, Г. А. Воробейков, Г. А. Ураев // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 5. – С. 13–18.
16. Абдурашитов С. Ф. Ростстимулирующий эффект симбиотических микроорганизмов на сорго под действием водodefицита / С. Ф. Абдурашитов, К. С. Грицевич, А. И. Алексеева, Э. Р. Абдурашитова // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2025. – Т. 55, № 1 (314). – С. 41–51.
17. Nosheen A. *Pseudomonas putida* improved soil enzyme activity and growth of kasumbha under low input of mineral fertilizers / A. Nosheen, H. Yasmin, R. Naz, A. Bano, R. Keyani, I. Hussain // Soil Science and Plant Nutrition. – 2018. – Vol. 64, No 4. – P. 520–525.
18. Зинченко М. К. Ферментативная активность аграрных почв Верхневолжья / М. К. Зинченко, С. И. Зинченко, А. А. Борин, О. П. Камнева // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 3. – С. 143.
19. Хазиев Ф. Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах / Ф. Х. Хазиев // Вестник академии наук РБ. – 2015. – Т. 20, № 2(78). – С. 14–24.
20. Драган Н. А. Почвенные ресурсы Крыма / Н. А. Драган. – Симферополь: Доля, 2004. – 208 с.
21. Карта почв России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://soil-db.ru/map?lat=45.5541&lng=35.5408&zoom=9&feature=35693>. – Дата обращения: 22.03.2025.
22. Страшная А. И. Автоматизированная технология мониторинга и расчета количества декад с почвенной и атмосферно-почвенной засухой под зерновыми культурами / А. И. Страшная, И. Э. Пурина, О. В. Чуб, О. И. Задорнова, Т. С. Чекулаева // Труды Гидрометцентра России. – 2013. – Вып. 349. – С. 161–175.
23. Практикум по физиологии растений / Под ред. Н. Н. Третьякова, Т. В. Карнауховой, Л. А. Паничкина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1990. – 271 с.
24. Гончарова Э. А. Водный статус культурных растений и его диагностика / Э. А. Гончарова; под ред. В. А. Драгавцева. – СПб.: ВИР, 2005. – 112 с.
25. Грицаенко З. М. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин та ґрунтів / З. М. Грицаенко, А. О. Грицаенко, В. П. Карпенко. – Київ: ЗАТ «НІЧЛАВА», 2003. – 320 с.
26. Методические рекомендации по оценке токсического действия пестицидов на микрофлору почвы / под общ. рук. Ю. В. Круглова. – М., 1981. – 43 с.
27. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
28. Туев Н. А. Микробиологические процессы гумусообразования / Н. А. Туев. – М.: Агропромиздат, 1989. – 239 с.
29. Denef K. Influence of dry–wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics / K. Denef, J. Six, H. Bossuyt, S. D. Frey, E. T. Elliott, R. Merckx // Soil Biology and Biochemistry. – 2001. – Vol. 33. – P. 1599–1611.