



Обзор

Полезные растительно-микробные взаимодействия и стрессоустойчивость кукурузы

Сарой Бурлакоти , Ананта Р. Девкота, Шитал Пудьял и Амита Каундал *

Департамент растений, почв и климата, Колледж сельского хозяйства и прикладных наук, Университет штата Юта, Логан, Юта 84332, США; saroj.burlakoti@usu.edu (SB); ananta.devkota@usu.edu (ARD); Shital.poudyal@usu.edu (ИП)

* Переписка: amita.kaundal@usu.edu

Аннотация: Полезные микробы имеют решающее значение для улучшения адаптации и роста сельскохозяйственных культур в условиях различных стрессов. Они улучшают усвоение питательных веществ, улучшают иммунные реакции растений и помогают растениям переносить такие стрессы, как засуха, засоление и жара. На потенциал урожайности любой культуры существенно влияют связанные с ней микробиомы и их способность улучшать рост в различных стрессовых условиях. Поэтому крайне важно и интересно понять механизмы взаимодействия растений и микробов.

Кукуруза (*Zea mays* L.) является одним из основных продуктов питания во всем мире, наряду с пшеницей и рисом. Кукуруза также является технической культурой во всем мире, 83% ее производства используется в кормовой, крахмальной и биотопливной промышленности. Кукуруза требует значительных азотных удобрений для достижения оптимального роста и урожайности. Растения кукурузы очень чувствительны к жаре, засолению и засухе и требуют инновационных методов смягчения вредного воздействия экологических стрессов и сокращения использования химических удобрений. В этом обзоре суммируются наши текущие представления о полезных взаимодействиях между растениями кукурузы и конкретными микробами. Эти полезные микробы повышают устойчивость растений к стрессу и повышают продуктивность. Например, они регулируют транспорт электронов, подавляют активность каталазы и повышают активность антиоксидантов. Мы также рассматриваем роль ризобактерий, способствующих росту растений (PGPR), в повышении стрессоустойчивости кукурузы. Кроме того, мы изучаем применение этих микробов в производстве кукурузы и выявляем основные пробелы в знаниях, которые необходимо устранить, чтобы полностью использовать потенциал полезных микробов.

Ключевые слова: абиотический и биотический стресс; полезные микробы; Стрессоустойчивость; кукуруза; ризобактерии, стимулирующие рост растений (PGPR); АМФ; микориза



Цитирование: Бурлакоти, С.; Девкота, Арканзас;

Пудьял, С.; Каундал, А. Бенефициал

Растительно-микробные взаимодействия и стресс

Толерантность кукурузы. Прил. Микробиол. 2024,

4, 10:00–10:15. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4030068>

applmicrobiol4030068

Академический редактор: Сабина Фиджан

Поступила: 4 июня 2024 г.

Пересмотрено: 18 июня 2024 г.

Принято: 20 июня 2024 г.

Опубликовано: 25 июня 2024 г.



Копирайт: © 2024 авторов.

Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе. распространяется на условиях и условия Creative Commons

Лицензия с указанием авторства (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

Кукуруза (*Zea mays* L.), наряду с пшеницей и рисом, является одним из основных продуктов питания во всем мире, ее мировое производство в 2020 году составило 1147,7 миллиона метрических тонн [1]. Кукуруза приобрела известность как техническая культура в мировом масштабе: 83% ее продукции направляется на использование в кормовой, крахмальной и биотопливной промышленности. Среди 125 развивающихся стран примерно 75 считают кукурузу основной культурой, на которую приходится 70% мирового производства кукурузы, происходящего из этих стран [2]. Кукуруза — культура, нуждающаяся в азоте, требующая значительного количества азотных удобрений для достижения оптимального роста и урожайности, особенно на вегетативной и ранней репродуктивной стадиях, которые более чувствительны к потребностям в азоте. Недостаточное снабжение азотом на этих этапах ограничивает развитие растений, снижает эффективность фотосинтеза и, в конечном итоге, снижает урожайность. Кроме того, посевы кукурузы чрезвычайно чувствительны к жаре, засолению и засухе. Прогнозируется, что глобальная урожайность кукурузы снизится на 20–40% при сценарии потепления на 2 °C и на 40–60% при сценарии потепления на 4 °C [5]. Изменчивость мирового производства кукурузы в период с 1980 по 2013 год можно объяснить тепловым стрессом и засухой [5]. Стресс из-за засоления еще больше усугубляет проблемы, снижая скорость прорастания кукурузы. Он вызывает осмотический стресс, подавляя поглощение воды семенами и задерживая прорастание [6]. В условиях солевого стресса

накопление Na^+ конкурирует с K^+ , что приводит к ингибированию синтеза белка [7]. Этот стресс вызывает ионную токсичность, образование активных форм кислорода (АФК) и осмотический стресс [8]. Помимо абиотических стрессов, от 6% до 19% производства кукурузы во всем мире ежегодно теряется из-за ущерба, причиняемого насекомыми и другими травоядными животными. Основными вредителями кукурузы являются листовая тля (*Rhopalosiphum maidis*), трипсы (*Frankliniella williamsi*) [9], совка осенняя (*Spodoptera frugiperda*), черная совка (*Agrotis ipsilon*), совка хлопковая (*Helicoverpa armigera*), кукурузная совка (*Helicoverpa zea*).) [10], стеблевая златка (*Elasmopalpus lignosellus*) и совка (*Spodoptera* spp.).

Микробиомы растений — это микроорганизмы, которые живут внутри и вокруг растений, образуя сложную микробную экосистему и могут играть значительную роль в росте и развитии растений. Эти микробиомы включают бактерии, грибы, нематоды, археи и вирусы, населяющие разные части растений. Эти части включают ризосферу (почва, окружающая корни), филлосферу (надземные части, такие как листья и стебли), эндосферу (внутренние ткани) и спермосферу (поверхности семян) [11,12]. Полезные растительно-микробные взаимодействия существенно влияют на рост и развитие растений и смягчают экологический стресс [13,14]. Растения тесно связаны с микробами во время своего роста и выживания; они играют значительную роль в доступности и усвоении питательных веществ растениями, а также в устойчивости растений к стрессу [15]. Исследования показали наличие ризобактерий, способствующих росту растений, из аборигенного растения *Ceanothus velutinus*, которое содержит несколько ризобактерий, обладающих свойствами, способствующими росту растений, такими как продукция ИУК, сидерофора, протеазы, каталазы, способности фиксировать азот и солюбилизацию фосфата [16]. Кроме того, инокуляция нативной почвы *Ceanothus velutinus* смесью для размножения способствовала размножению черенками, а изоляты, продуцирующие ИУК, из ризосферы способствовали росту *Arabidopsis* [17]. Таким образом, изучение того, как микробиомы растений могут повысить урожайность кукурузы и помочь ей противостоять различным биотическим и абиотическим стрессам, имеет решающее значение. В этом обзоре основное внимание уделяется полезным взаимодействиям растений и микробов в кукурузе для повышения урожайности и смягчения экологического стресса. Цель состоит в том, чтобы определить новые стратегии с высоким потенциалом реализации для укрепления сельскохозяйственной экономики и удовлетворения спроса на методы, которые смягчают последствия засухи и других стрессовых факторов в производстве кукурузы. Подчеркивание связи между кукурузой и ее микробиомом открывает многообещающую область исследований для повышения продуктивности и урожайности.

2. Абиотические стрессы и их влияние на продуктивность сельскохозяйственных культур.

Чтобы удовлетворить высокий потребительский спрос на кукурузу, ее часто выращивают в засушливых районах, где кукуруза может испытывать стресс, связанный с засухой. Жизненный цикл кукурузы включает различные стадии роста, включая появление и развитие всходов, вегетативный рост, цветение и опыление, наполнение зерна и созревание. Засуха и высокие температуры могут негативно повлиять на посевы кукурузы на всех этих стадиях роста, причем наиболее значительные последствия оказываются на стадиях вегетации и налива зерна, а также когда растения достигают стадии восьмого листа [18]. В регионах, где в вегетационный период наблюдается дефицит воды, производство кукурузы может снизиться до 15% [19]. В ключевых регионах Китая, выращивающих кукурузу, около 60% посевов испытывают водный и тепловой стресс, что приводит к снижению годовой урожайности на 30% [20].

Аналогичным образом, различные исследования показали, что повышение температуры на 6 °C выше 35

°C в течение 3 дней в период шелковистости снижает урожайность на 13% в США [21]; температура от 33 до 36 °C в период до и после цветения снижала урожайность у *Ar-gentina* на 10–45% [22]; а каждый градус выше 30 °C на репродуктивной стадии снижал урожайность на 1–1,7% в Африке [23]. Однако самая тревожная перспектива – будущее. Согласно прогнозам, в условиях продолжающегося изменения климата и глобального изменения погодных условий водный и тепловой стресс приведет к сокращению мировых поставок кукурузы на 15–20% в год [18]. Повышенные температуры, превышающие 35 °C, могут препятствовать репродуктивному и вегетативному росту кукурузы от прорастания семян до налива зерна, заключительного этапа [24]. В то же время, когда кукуруза сталкивается с водным и тепловым стрессом во время репродуктивных фаз, она становится еще более уязвимой [25]. Воздействие стресса засухи на кукурузу включает уменьшение площади листьев, низкую эффективность использования воды, меньшее поглощение питательных веществ, снижение эффективности фотосинтеза, снижение накопления биомассы и снижение продуктивности. Исследования показали, что водный стресс во время вегетативного роста может

снижают скорость роста, замедляют развитие корневой системы, продлевают вегетативную фазу, вегетативный рост может снизить скорость роста, замедлить развитие корневой системы, про- и повлиять на распределение CO₂. Краткий период нехватки воды может привести к снижению на 28–32%.

продлевает вегетативную фазу и влияет на распределение CO₂. Краткий период дефицита воды может достигать сухой массы во время вегетативного роста и 66–93% во время формирования метелки/колоска [26].

приводят к снижению сухой массы на 28–32% во время вегетативного роста и на 66–93% во время продолжительного стресса засухи перед цветением, что может уменьшить размер листьев и расстояние между узлами;

образование кисточек/ушей [26]. Длительный стресс от засухи перед цветением может привести к уменьшению листьев, задержке появления шелковицы и метелок, что приведет к снижению общего урожая на 15–25% [27].

Кроме того, даже несколько дней стресса засухи во время опыления/оплодотворения могут привести к

Общее снижение урожайности на 25% [27]. Кроме того, даже несколько дней засухи вызывают стресс при формировании аномального зародыша и меньшее количество зерен на растение. Стресс от засухи до и после

опыление/оплодотворение может привести к аномальному образованию зародышей, а меньшее количество зерен при опылении связано со значительным уменьшением количества зерен [27]. Первичное фотосин- растение. Стресс засухи до и после опыления связан со значительным снижением тетической активности растений кукурузы, происходящим в их пяти- или шестиколосных листьях, что в основном способствует

в наборе ядер [27]. Первичная фотосинтетическая деятельность растений кукурузы осуществляется в их пятирастительной биомассе. Однако стресс от засухи может снизить скорость фотосинтеза за счет снижения

или шестиколосные листья, в основном вносящие вклад в биомассу растений. Однако стресс от засухи может привести к уменьшению размера листьев и замедлению роста урожая [28].

минимизировать скорость фотосинтеза за счет уменьшения размера початковых листьев и замедления роста сельскохозяйственных культур [28].

Более высокие температуры на репродуктивных стадиях, таких как метелка, опыление и получение зерна.

наполнения, может снизить качество зерна кукурузы. Исследование Изаурральде и соавт. [29] предполагает, что повышение средней сезонной температуры на 1 °C может снизить экономическую урожайность кукурузы на 1 °C. Исследование Хуссейна и др. [20] на двух гибридах кукурузы Xida 319 и Xida 889, подвергнутых тепловому стрессу, наблюдалось снижение высоты растений, снижение накопления биомассы и

в результате теплового стресса наблюдалось снижение высоты растений, снижение накопления биомассы и снижение урожайности.

Повышение урожайности, повышение эффективности использования света при выращивании кукурузы

растений, что приводит к деградации фотосинтеза. Кроме того, повышение температуры на стадии цветения кукурузы приводит к замедлению роста [30]. Аналогично, экспозиция

уменьшение кукурузы репродуктивной фазы, что приводит к деградации фотосинтеза, что приводит к снижению урожайности, содержанию хлорофилла и размеру метелки [31].

Снижение стресса является одним из нескольких биотических и абиотических стрессов, влияющих на урожайность кукурузы. Повысилась

Повышенная концентрация соли снижает высоту и биомассу растений из-за высокой осмотической ионной токсичности [32]. В ответ на замедление роста следует снижение устьичной проводимости

продукции антифосфолипидных ферментов и нарушение функции цитозольных ферментов и нарушение ферментов

файла цитозоля [33,34]. В исследовании Койли и соавт. [35], применяя ферменты фиксации углерода [33,34]. В исследовании

концентрация в 100 мМ NaCl во время репродуктивной фазы кукурузы снижает массу зерна и урожайность 100 мМ NaCl во время

на 15% и 25% в ответ на аномальным образом, исследование Кетелре [36] показали 11,3%

снижение урожайности зерна кукурузы в 11,3% в ответ на повышенную концентрацию соли. Увеличение количества соли

Устойчивость растений кукурузы к засухе и солености кукурузы поглощать ионы нитрата. Концентрация влияет на

из-за взаимодействия нитрата и нитрата [37]. Эффект нитрата на фотосинтетический

Описание на рисунке 1B.

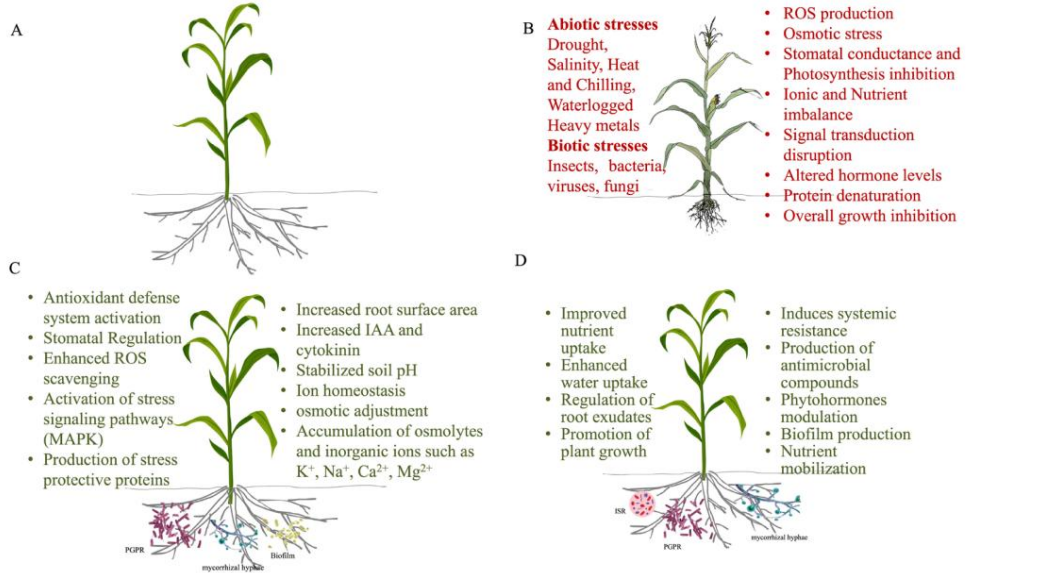


Рисунок 1. Обзор реакции кукурузы на абиотические и биотические стрессы. (A) здоровое растение кукурузы. (B) реакции кукурузы на абиотические и биотические стрессы. (C) механизмы толерантности к абиотическим стрессам, включая осмотическую регуляцию, антиоксидантную активность и устьичная регуляция, а также (D) механизмы толерантности к биотическому стрессу, такие как активация белков, связанных с патогенозом, и структурных барьеров.

3. Механизм устойчивости к абиотическому стрессу у кукурузы.

Растения выработали различные механизмы, позволяющие справляться с различными абиотическими стрессами. Ниже описаны три основных абиотических стресса кукурузы.

3.1. Стресс, вызванный

засухой Чтобы справиться со стрессом, вызванным засухой, растения кукурузы развили различные механизмы, которые можно разделить на стратегии бегства, избегания и толерантности [38]. Спасение от засухи означает сокращение жизненного цикла сельскохозяйственных культур во избежание стресса, вызванного засухой, что особенно важно на стадиях репродуктивного роста. Такие признаки, как дни до посева, цветение и зрелость, генетически наследуются, что позволяет осуществлять фенологические корректировки в ответ на наличие воды [38]. Выведение раннеспелых сортов помогает избежать стресса, вызванного засухой [39]. Однако эта стратегия может снизить урожайность, поскольку продолжительность урожая напрямую коррелирует с урожайностью [40]. Путем отбора сельскохозяйственные культуры корректируют период своего роста в зависимости от доступной влаги, завершая свой жизненный цикл до наступления засухи. Растения кукурузы пытаются завершить репродуктивную стадию до того, как засуха станет более распространенной. Кукуруза, будучи очень восприимчивой к засухе, получает значительную выгоду от этого механизма спасения [41].

Предотвращение засухи у кукурузы оценивается путем измерения состояния воды в тканях, на что обычно указывает тургорный водный потенциал в условиях стресса, вызванного засухой. Избегание предполагает поддержание водного статуса растений за счет снижения скорости транспирации или увеличения поглощения воды [42]. Различные физиологические и морфологические признаки являются важными критериями отбора для предотвращения засухи у кукурузы, включая скручивание листьев, поджигание листьев, температуру кроны, закрытие устьиц, признаки листьев и свойства корней [43]. Устьица регулируют транспирацию и газообмен, управляя фотосинтезом и дыханием. Растения уменьшают потерю воды, закрывая устьица, сохраняя водный статус и способствуя предотвращению засухи. Устойчивость к засухе в сочетании с жарой и засухой предполагает поддержание роста и развития посредством клеточной и биохимической адаптации. Наряду с поддержанием среднего физического роста, устойчивость к засухе также связана со стабильностью урожайности в условиях нехватки воды – сложного процесса, в ходе которого сельскохозяйственные культуры выработали различные естественные механизмы адаптации и устойчивости к стрессу от засухи [44]. Эти адаптации включают накопление совместимых осмолитов, таких как пролин, глицин-бетаин, растворимые сахара и вариации посредством наших Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- и NO_3^-), для поддержания водного статуса растений неорганических ионов (K^+ , Na^+ осмотическая регулировка [44,45].

Кроме того, для смягчения окислительного повреждения активируются ферментные и неферментативные антиоксидантные системы, включая супероксиддисмутазу (СОД), каталазу (КАТ), пероксидазу (ПОД) и аскорбатпероксидазу (АПХ). Регуляторы роста, такие как абсцизовая кислота (АБК), также играют роль [20,28]. Более того, транскрипционные факторы (TF) активируются для регуляции экспрессии генов, чувствительных к засухе и высоким температурам, в то время как стрессовые белки, такие как белки теплового шока (HSP), белки позднего эмбриогенеза (LEA) и аквапорины, помогают движению воды в условиях стресса [41].

Аналогичным образом, антиоксиданты — это молекулы, которые защищают растения, удаляя активные формы кислорода, предотвращая тем самым окислительное повреждение. Они образуют защитный щит от окислительного стресса. Антиоксиданты могут быть ферментативными и неферментативными. Ферментативные антиоксиданты включают каталазу (КАТ), супероксиддисмутазу (SOD), глутатионредуктазу (GR), аскорбатпероксидазу (АПХ), пероксидазу и полифенолоксидазу. Неферментативные антиоксиданты включают α -токоферол, аскорбиновую кислоту, β -каротин, глутатион и цистеин [46]. Эти компоненты необходимы для нейтрализации активных форм кислорода и сохранения здоровья растений в условиях окислительного стресса. Растительные гормоны, также известные как регуляторы роста растений или фитогормоны, играют жизненно важную роль в регулировании роста и развития растений, действуя как сигнальные молекулы, которые запускают клеточную дифференцировку и функционируют локально или транспортируются к отдаленным целям.

В ответ на стресс засухи растения подвергаются различным адаптациям, включая поддержание эндогенного гормонального баланса [47]. Устойчивость к засухе обеспечивают различные регуляторы роста растений, в том числе ауксины, цитокинины, абсцизовая кислота (АБК), гиббереллины, салициловая кислота, brassinosteroids, метилжасмонат, полиамины, этилен и зеатин. Эти г

взаимодействуют, регулируя реакции растений, конкретные стадии роста, ткани и условия окружающей среды. Например, ауксины участвуют в реакциях на стресс, вызванный засухой, при этом наблюдаются взаимодействия между этиленом, цитокининами и ауксинами, влияющие на их биосинтез [4]. При стрессе засухи в листьях кукурузы снижается концентрация индолуксусной кислоты (ИУК), а накопление АБК увеличивается, влияя на гормональный баланс. Накопление ИУК у кукурузы увеличивается при умеренном стрессе (13,4%) и снижается при сильном стрессе засухи (63,2%) [28]. Салициловая кислота помогает поддерживать фотосинтез, сохраняя более высокое содержание хлорофилла при стрессе засухи, способствуя устойчивости к засухе [50]. АБК и этилен антагонистически регулируют устьичную проводимость, количество зерен, скорость наполнения зерен и рост верхушек растений, при этом цитокинин усиливает рост и развитие. АБК играет решающую роль в качестве гормона стресса, модулируя рост, развитие и реакции на стресс посредством сигнального пути, включающего различные компоненты, высокочувствительные к АБК. Средняя доступность воды не вызывает накопления АБК, а чрезвычайно сильная засуха снижает накопление АБК из-за прекращения образования предшественников АБК [51]. Система антиоксидантной защиты детоксицирует АФК и поддерживает окислительно-восстановительный гомеостаз [52]. Общий гормональный баланс растений имеет решающее значение для различных процессов роста и развития, при этом взаимодействие между гормонами играет решающую роль в адаптации растений к стрессу, вызванному засухой.

3.2. Солевой стресс.

Дисбаланс в процессе клеточного ионного обмена вызывает солевой стресс у растения. Из-за этого ионного дисбаланса происходит приток Na^+ и отток K^+ через различные переносчики ионов в клеточной мембране [53]. Избыточная концентрация Na^+ увеличивает окислительный стресс за счет увеличения производства АФК (активных форм кислорода) [54]. В результате клеточные мембраны разрушаются, что приводит к нарушению клеточного гомеостаза. Во время солевого стресса активируются гены и транскрипционные факторы, регулирующие транспорт ионов, что помогает снизить ионную токсичность в клетках. К ним относятся белок плазматической мембраны (PMP), транспортер с высоким сродством к натрию (НКТ), путь сверхчувствительности к соли (SOS) и обменники Na^+/H^+ (NHX) [55]. ZmCIPK24a и ZmCBL4 плюс ZmCBL8 действуют как SOS2 и SOS3 у кукурузы [56]. Во время солевого стресса SOS3 ощущает изменения уровня цитоплазматического Ca^{2+} , что активирует SOS2. Комплекс SOS2-SOS3 фосфорилирует ZmSOS1, активируя SOS1 и увеличивая отток Na^+ из корня в почву, повышая солеустойчивость [57]. Одно исследование идентифицировало QTL для содержания K^+ (qKC3), который кодирует ZmHKT2, транспортер K^+ , локализованный в паренхиме ксилемы [58]. ZmHKT2 снижает содержание K^+ в побегах за счет извлечения K^+ из сосудов ксилемы. Мутанты, лишённые ZmHKT2, имеют более высокое содержание K^+ в побегах и солеустойчивость [59]. Снижение активности ZmHKT2 является жизнеспособной стратегией для создания солеустойчивых сортов кукурузы.

3.3. Перегрев

Осмотическая регуловка – это механизм, который помогает растениям кукурузы справляться с высокими температурами. Это предполагает создание водного градиента для усиления притока воды, тем самым поддерживая тургор за счет снижения осмотического потенциала. Эта корректировка помогает сохранить водный статус тканей за счет минимизации вредного воздействия засухи за счет накопления растворенных веществ в клеточной цитоплазме и вакуолях. Поддерживая тургорный потенциал и поддерживая физиологические процессы, осмотическая регуловка защищает от повреждений, вызванных засухой [60]. Относительное содержание воды является важнейшим показателем для оценки засухоустойчивости растений с закрытыми устьицами и пониженным накоплением CO_2 в результате снижения относительного содержания воды в условиях стресса засухи [42]. Устойчивая регуляция скорости фотосинтеза и тургорного потенциала обеспечивает транслокацию фотосинтетических ассимилятов в раз-

Осмопротекторы, в том числе азотистые соединения, такие как пролин, полиолы, полиамины и глицин-бетаин, а также гидроксисоединения, такие как многоатомные спирты, сахароза и олигосахариды, играют решающую роль в осмотической регуловке [62]. Эти соединения защищают клеточные белки и мембраны от эффектов обезвоживания и помогают поддерживать целостность клеток [63]. Глицин-бетаин, например, действует как важный осмопротектор, защищая растения от различных стрессов, таких как засуха, засоление, холод и жара, защищая фотосинтетический аппарат и стабилизируя клеточные белки [64]. Пролин,

еще один осмопротектор, помогает поддерживать водный статус, защищать клеточные мембраны и предотвращать денатурацию белков при осмотическом стрессе [64,65]. Растворимые сахара, накапливающиеся в ответ на стресс от засухи, выполняют множество функций в метаболизме и защите растений, в том числе действуют как субстраты для процессов биосинтеза и защищают клеточные органеллы посредством витрификации [66]. Полиолы, такие как сорбит, глицерин и маннит, образуют гидратные сферы вокруг макромолекул, предохраняя их от обезвоживания [67]. Эти механизмы в совокупности способствуют способности растений переносить стресс засухи и поддерживать важные физиологические процессы.

4. Биотический стресс и растениеводство

Хотя абиотический стресс является основным препятствием на пути достижения потенциального урожая кукурузы во всем мире, биотический стресс также угрожает выращиванию кукурузы, часто приводя к значительным потерям урожая [68]. Болезни, насекомые и вредители являются основными факторами, ответственными за эти потери, а такие патогены, как грибы, бактерии и вирусы, вызывают такие синдромы, как гниль початков/стеблей/зерен, карликовая болезнь/увядание и северная пятнистость листьев/мозаика кукурузы [69]. , которые являются основными болезнями, снижающими урожайность кукурузы. Одновременное возникновение абиотического и биотического стресса усугубляет ситуацию, что приводит к значительному сокращению мирового производства кукурузы. Исследования показывают, что снижение урожайности основных сельскохозяйственных культур, включая кукурузу, происходит более чем на 50% только из-за абиотического стресса. Для сравнения, примерно 10% урожайности кукурузы ежегодно теряется из-за биотических стрессов во всем мире [70], а 22,5% глобальных потерь кукурузы происходит из-за болезней и вредителей. Один только европейский кукурузный мотылек причинил убытки в размере до 2 млрд долларов США в год в США, а в северных регионах Китая произошло 50%-ное снижение урожайности из-за северной фитофтороза [71]. Аналогичным образом, *Colletotrichum graminicola*, вызывающий антракноз кукурузы, представляет собой серьезную угрозу, вызывающую ежегодные потери до 1 миллиарда долларов США, в то время как кукурузный долгоносик (*Sitophilus zeamais*) повреждает более 30% зерна во время хранения на фермах [70]. Производство высококанцерогенных афлатоксинов только *Aspergillus flavus* привело к ошеломляющим потерям в 686,6 миллионов долларов США при выращивании кукурузы в США. Эти статистические данные не просто статистика, а суровое напоминание об экономическом хаосе, вызванном биотическим стрессом. Другие климатозависимые патогены, такие как *Fusarium spp.* и *Ustilago maydis* еще больше усугубляют проблему [72,73]. Среди многочисленных стратегий борьбы с биотическим стрессом, вызываемым такими патогенами, использование полиаминов (ПА) оказалось эффективной стратегией снижения биотического стресса, вызываемого различными патогенами в кукурузе. ПА играют решающую роль в производстве H_2O_2 , действуя как в качестве защитного инструмента, так и в качестве сигнальной молекулы в ответ на биотический стресс [73]. Например, спермин (Spm), форма ПА, действует как сигнальная молекула в защите от патогенов и играет решающую роль в устойчивости к вирусным инфекциям [74]. В случае *Ustilago maydis*, диморфного гриба, специфичного для хозяина, он вызывает «huitlacoche» или обыкновенную головню у растений кукурузы. Накопление H_2O_2 , образующегося из полиаминоксидазы, играет существенную роль в образовании опухолей, вызванных *U. maydis*, у растений кукурузы. Было обнаружено, что транскрипционный фактор полиаминоксидазы кукурузы (zMPAO) снижается в опухолях. Наблюдалось уменьшение симптомов заболевания при применении 1,8-диаминооктана (1,8-ДО), мощного ингибитора полиаминоксидазы [73]. Эффект аб

5. Полезные растительно-микробные взаимодействия в кукурузе

5.1. Арбускулярный микоризный симбиоз

Кукуруза образует симбиотические ассоциации с арбускулярными микоризными (АМ) грибами. Это партнерство, установленное через микоризный и корневой путь, позволяет растениям эффективно поглощать питательные вещества из почвы. В этом симбиозе грибы и растения участвуют во взаимном обмене, при котором грибы обеспечивают минеральные питательные вещества, а растения — углерод (С). Корни кукурузы, помимо полезных связей с микробами, такими как микоризные грибы, играют решающую роль в усвоении питательных веществ, таких как фосфор (Р) и азот (N). Корневые остатки кукурузы, важный побочный продукт этого симбиоза, обеспечивают азотом другие растения в севообороте, тем самым повышая продуктивность сельского хозяйства [75,76]. Этот обмен происходит через арбускулы внутри клеток коры корня, где АМ-грибы приобретают 4–20% общего количества фотосинтеза.

углерод фиксируется растением посредством симбиотических отношений. Гифы АМ-грибов затем используют этот углерод для образования специализированных экссудатов, которые привлекают и создают микробиом гифосферы. Этот микробиом играет решающую роль в компенсации неспособности грибов напрямую использовать органические питательные вещества. Секретируя ферменты и способствуя минерализации источников органических питательных веществ, микробиом гифосферы значительно увеличивает доступность азота и фосфора. Эта совместная функциональность внутри холобионта существенно увеличивает доступность питательных веществ для всех взаимодействующих организмов, включая растения, АМ-грибы и гифосферные бактерии (рис. 1С, D).

У кукурузы колонизация корней кукурузы АМ-грибами начинается на ранней стадии развития растения и достигает пика на стадиях вегетативного роста. Корни кукурузы вырабатывают стриголактоны (5-дезоксистригол и соргумол), которые необходимы для установления симбиоза АМ [77,78]. Эти соединения действуют как хемоаттрактанты и направляют гифы грибов к корневой системе [79]. При контакте со стриголактонами АМ-грибы инициируют сигнальные каскады, которые активируют такие гены, как SYM и RAM1, участвующие в колонизации. Как и у других растений, таких как морковь, корни кукурузы образуют на поверхности корня аппараты предварительного проникновения (РРА), облегчающие проникновение грибковых гиф в ткань корня. При проникновении грибные гифы инициируют ряд молекулярных событий, таких как продукция хитина и липохитоолигосахаридов для распознавания и передачи сигналов между растениями и грибами [80]. Передача сигнала также приводит к активации факторов транскрипции и образованию арбускул. Белки грибного происхождения, такие как малые секретиремые эффекторные белки (SSEP), транспортируются в растительную клетку и, как полагают, играют роль в формировании и функционировании арбускул [81]. Обмен питательными веществами между грибами и растениями кукурузы происходит внутри арбускул. Помимо арбускул, внутри клеток корня образуются везикулы, которые действуют как структуры хранения липидов, гликогена и других метаболитов.

Как только устанавливается симбиоз между АМ-грибами и растениями кукурузы, АМ-грибы могут увеличивать объем корня, увеличивая площадь поверхности для поглощения воды. D-мио-инозитол-3-фосфатсинтаза (IPS) и 14-3-3-подобный белок GF14 (14-3GF) играют решающую роль в облегчении передачи сигналов между кукурузой и АМФ во время стресса, вызванного засухой. Было показано, что совместная экспрессия этих двух генов значительно повышает устойчивость кукурузы к засухе [82]. Аналогично, инфекция АМ-грибами повышает уровень экспрессии гомологов NPF4.5, что указывает на более высокое поглощение нитратов во время симбиоза [82]. Транспортёр аммония ZmAMT3;1, экспрессируемый в корковых клетках кукурузы при заражении АМ-грибами, поглощает 68–70% транспортируемого азота АМ-грибами к растениям кукурузы [83].

5.2. Азотфиксирующий симбиоз с ризобиями

Ризобии, широко распространенные грамотрицательные бактерии в почве, могут улучшить выращивание кукурузы. Несмотря на то, что эти полезные бактерии в первую очередь связаны с бобовыми, они могут стимулировать рост и урожайность кукурузы посредством различных механизмов. Хотя их эффективность при использовании кукурузы обычно ниже, чем при использовании бобовых, потенциал для улучшения является многообещающим [84].

Было обнаружено, что инокуляция штамма *Azospirillum* в корни кукурузы повышает уровень GA3, тем самым ускоряя рост корней [85]. Аналогично, штаммы *Rhizobium* (такие как *R. etli* bv. *Phaseoli* и *R. leguminosarum* bv. *trifolii*) и *Sinorhizobium* sp. показали многообещающие результаты в усилении роста, увеличении высоты растений и повышении урожайности зерна кукурузы [86]. В многочисленных исследованиях сообщалось об азотфиксирующей способности *Herbaspirillum* seopedicae и *Azospirillum* spp. в кукурузе. Исследование на двух генотипах кукурузы Морган 318 и Декалб 4Д-70 продемонстрировало достоверное увеличение урожайности зерна и более высокое накопление N при инокуляции смесью *Azospirillum* spp. штаммов, результат сравним с применением 100 кг N га⁻¹ [87]. Другое исследование выявило связь азотфиксации с местным сортом кукурузы, выращенной на обедненных азотом почвах в Мексике. Микрокислородную среду для лучшей фиксации азота создает слизистая трубка, окружающая корни, в которой имеется высокое обилие протеобактерий [88]. Эти симбиотические отношения имеют решающее значение для улучшения роста растений.

более высокое усвоение питательных веществ и урожайность, что дает обнадеживающие перспективы на будущее выращивания кукурузы.

5.3. Применение стресс-толерантных микробов в сельском хозяйстве.

Использование стресс-толерантных микробов показывает значительное увеличение урожайности растений кукурузы. Растения кукурузы, инокулированные *Piriformospora indica*, эндофитным грибом, выращенным в условиях засухи, имели увеличенную площадь листьев, значение SPAD, более высокий вес свежего и сухого корня, а также повышенную активность антиоксидантов, включая каталазу и супероксиддисмутазу.

Активация генов, связанных с засухой, DREB2A, CBL1, ANAC072 и RD29A, повышает устойчивость к стрессу, вызванному засухой [89]. *Bacillus* spp. PM31 также улучшил рост кукурузы в условиях засоления [90]. Микробы можно применять для повышения урожайности растений и улучшения здоровья почвы.

Стрессоустойчивые микробы могут заменить 20–40% химических удобрений, одновременно смягчая воздействие стресса, вызванного засухой. Интеграция устойчивых к стрессу бактерий с другими полезными микробами, такими как AM-грибы, может повысить стрессоустойчивость кукурузы и других растений, предлагая более значительные преимущества для сельского хозяйства. Эти микробы могут быть интегрированы в агрономическую практику посредством различных стратегий применения, которые способствуют устойчивому сельскому хозяйству, как указано в Таблице 1.

5.4. Микробно-индуцированная системная устойчивость (ISR) кукурузы.

Системная приобретенная устойчивость (SAR) и индуцированная системная устойчивость (ISR) представляют собой разные механизмы, с помощью которых растения могут развивать системную устойчивость к патогенам и болезням. SAR — это защитный механизм растений, который защищает растения от широкого спектра патогенов после первоначального заражения. SAR индуцируется путем распознавания патоген-ассоциированных молекулярных структур (PAMP) или эффекторных молекул, высвобождаемых патогенами. ISR — это защитный механизм растений, при котором воздействие определенных полезных микроорганизмов, патогенов или химических соединений стимулирует иммунную систему растения повышать ее устойчивость к последующим атакам патогенов. В отличие от SAR, который индуцируется прямой инфекцией патогена, ISR запускается полезными микробами или определенными химическими соединениями в среде растений [92].

ISR — это сложный процесс, который включает активацию различных защитных реакций внутри растения, включая выработку антимикробных соединений, укрепление клеточных стенок и активацию генов, связанных с защитой. ИСП вызывают непатогенные ризобактерии, колонизирующие ризосферу. Микробы стимулируют врожденную иммунную систему растения, усиливая ее защитную реакцию против последующих атак патогенов и насекомых [93]. Конкретные микроорганизмы, такие как полезные ризобактерии, *B. velezensis* SQR9 и гриб *Trichoderma harzianum*, играют решающую роль в индукции ISR кукурузы против патогенов. *B. velezensis* SQR9 колонизирует корни кукурузы и активирует защитные сигнальные пути. Эта колонизация приводит к обогащению биосинтеза фенилпропаноидов, метаболизма аминокислот и путей взаимодействия растений и патогенов в корнях кукурузы. Путь передачи сигналов кальция имеет решающее значение в ISR, индуцированном SQR9, поскольку ингибирование передачи сигналов кальция ослабляет индуцированную устойчивость [58]. Аналогичным образом, *T. harzianum* вызывает ISR у кукурузы против пятнистости листьев *Curvularia*, высвобождая целлюлазы и целлобиозу из корней. Целлобиоза, высвобождаемая из корней, колонизированных *T. harzianum*, вызывает экспрессию защитных генов (*Opr7*, *Pr4*, *Aoc1*, *Erf1*) в кукурузе, тем самым усиливая ISR против патогена [94]. ISR у кукурузы включает сигнальные пути жасмоновой кислоты и этилена, опосредованные белком NPR1.

Таблица 1. Ризобактерии, стимулирующие рост растений (PGPR), которые повышают стрессоустойчивость кукурузы.

Связанные с хозяином микробные штаммы	Эффект/механизм стрессоустойчивости	Рекомендации
Полезная устойчивость к стрессу, обусловленная микробами		
Rhizobium R. etli bv. Phaseoli, R. leguminosarum bv. Трифолии, Sinorhizobium sp.	Усиленный рост, увеличение высоты растений, повышение урожайности зерна.	[86]
Herbaspirillum seopedicae Azospirillum sp.	Увеличение урожайности зерна Более высокое накопление N	[87]
Пириформоспора индийская	Увеличенная площадь листьев и значение SPAD Увеличение свежего и сухого веса корней. Снижение накопления малонового диальдегида (МДА). Активация антиоксидантов и генов, связанных с засухой	[89]
Псевдомонас путида	Формируют жизнеспособные биопленки вокруг корней. Повышенная удерживающая способность почвы Улучшенная структура почвы	[95]
синегнойная палочка Alcaligenes faecalis Протей пенери	Повышенная влажность почвы Улучшенные характеристики роста растений, такие как площадь листьев, длина побегов и длина корня. Снижение активности каталазы, аскорбатпероксидазы и глутатионпероксидазы	[96]
Клебсиелла варикола Псевдомонада флюоресценс Раультелла плантикола	Повышенный уровень бетаина, глицина и холина. Улучшенный рост растений	[97]
Буркхолдерия сп. Мицуария сп.	Повышенное накопление пролина и фитогормонов. Более высокая антиоксидантная активность Уменьшение содержания MDA	[98]
Мегатирс максимальный	Повышенное накопление пролина Снижение содержания MDA Снижение активности глутатионредуктазы	[99]
Азоспириллы бразильские Псевдомонас путида Сфингомонас	Симкомы, содержащие эти микробы, имели увеличенную сухую массу побегов, сухую массу корней и высоту растений.	[100]
Азоспириллы липоферум	Повышенное накопление пролина, растворимых сахаров и аминокислот. Увеличенная масса побегов и корней, длина корня.	[101,102]
Бацилла сп.	Повышенное накопление пролина Уменьшение утечки электролита Снижение активности антиоксидантов	[103]
Burkholderia phytofirmans Штамм PsJN Enterobacter sp. ФД17	Увеличение биомассы корней и побегов Повышенное содержание хлорофилла Увеличение площади листьев и скорости фотосинтеза.	[104]
Ризофаг неправильный	Повышенная гидравлическая проводимость и коэффициент водопроницаемости. Повышенное фосфорилирование внутренних белков плазматической мембраны (PIP) Повышенная фотосинтетическая активность	[105]
Б пумилиус	Повышенное относительное содержание воды и осмотический потенциал. Более высокая фотосинтетическая активность Увеличение производства АБК	[106]
Азоспириллы бразильские SP-7 Гербаспириллы серопедические Z-152	Снижение экспрессии ZmVP14.	[107]

Таблица 1. Продолжение.

Связанные с хозяином микробные штаммы	Эффект/механизм стрессоустойчивости	Рекомендации
Микробно-опосредованная полезная толерантность к солевому стрессу		
Бацилла сп. ПМ31	Улучшение роста кукурузы в условиях засоления	[90]
Совместная инокуляция Rhizophagus interradices Massilia sp. PK4	Повышенное усвоение питательных веществ Повышенная колонизация корней AMF Снижение уровня пролина в листьях	[108]
Ризобиум сп. Псевдомонас сп.	Повышенное производство пролина Снижение утечки электролита Сниженный осмотический потенциал Селективное поглощение ионов K	[109]
Pseudomonas fluorescens, P. syringae, P. chromaphis Enterobacter аэрогены	АСС-деаминаза для увеличения высоты растений, биомассы и урожайности початков Увеличение массы зерна и выхода соломы Увеличение поглощения P и K Более высокое соотношение K+/Na+	[110]
Гломус моссеа	Повышенное накопление растворимого сахара Увеличение общего количества органических кислот, накопление уксусной кислоты, яблочной кислоты, щавелевой кислоты, фумаровой кислоты и лимонной кислоты. Повышенная регуляция процесса осморегуляции	[111]
Б. amyloliquefaciens SQR9	Повышенное содержание хлорофилла Повышенное содержание растворимых сахаров Снижение уровня Na+ Повышение регуляции эритроцитов, RBCL, H+ -PPase, HKT1, NHX1, NHX2 и NHX3	[112]
Кокурия ризофила Y1	Повышенная фотосинтетическая способность и относительное содержание воды. Повышенный уровень антиоксидантов Снижение уровня Na+	[113]
Азотобактер хромококк	Повышенное соотношение K+/Na+ Повышенное содержание хлорофилла Повышенная концентрация пролина	[95]
Полезная толерантность к тепловому стрессу, опосредованная микробами		
Бацилла сп. АН-08, АН-67, АН-16 Pseudomonas sp. Ш-29	Повышение регуляции белков теплового шока (HSP) Увеличение общего хлорофилла, каталазы и пероксидазы. Увеличенная высота растений, площадь листьев, а также вес свежих и сухих корней и побегов. Снижение концентрации МДА	[114]
Rhizophagus interradices Funneliformis mosseae F. geosporum	Повышенная квантовая эффективность PSII Более высокая скорость фотосинтеза Увеличение высоты растения, ширины листьев и количества початков.	[115]
Гломус этуникатум	Повышенное содержание воды и потенциал воды в листьях Повышенная фотосинтетическая активность Более высокая устьичная проводимость	[116]
Гломус сп.	Регуляция транспорта электронов через PSII Увеличенная высота растения и ширина листьев.	[117]

6. Проблемы и перспективы на будущее

Значительное влияние абиотических и биотических стрессов на рост и развитие растений кукурузы невозможно переоценить. Солевой стресс нарушает поглощение воды и питательных веществ , а стресс засухи препятствует фотосинтетической активности, снижая урожайность кукурузы. Несмотря на

их жароустойчивость, длительное воздействие температур выше 35 °C губительно для роста и развития сельскохозяйственных культур, а превышение 40 °C в период цветения и налива зерна приведет к снижению урожайности зерна.

Несмотря на известные преимущества растительно-микробных взаимодействий, таких как арбускулярные микоризные (АМ) грибы и ризобии, а также бактериальные и грибковые эндофиты, еще многое предстоит узнать о разнообразии полезных микробов, присутствующих в ризосфере кукурузы, и их специфических функциях. Понимание того, какие микробы наиболее полезны в различных условиях выращивания и типах почв, имеет решающее значение для оптимизации микробных инокулянтов. Взаимодействия между интродуцированными полезными микробами и естественной почвенной микробиотой сложны и плохо изучены. Конкуренция, сотрудничество и антагонистические взаимодействия между микробами могут влиять на их эффективность в стимулировании роста растений. Для решения текущих проблем, стоящих перед обществом и учеными, будущая работа должна быть сосредоточена на оценке долгосрочной устойчивости последствий, вызываемых микроорганизмами. Это включает в себя оценку стабильности этих эффектов в течение нескольких вегетационных периодов и различных условий окружающей среды. Важно отметить, что ключевым аспектом является выбор наиболее эффективных микробных штаммов для конкретных условий, таких как засуха, засоление, тепловой стресс или дефицит питательных веществ. Обучение фермеров использованию и эффективности биоудобрений является еще одной важной задачей.

Необходимы дополнительные исследования для оценки долгосрочного воздействия микробной инокуляции на здоровье почвы, динамику микробного сообщества и продуктивность сельскохозяйственных культур. Мы несем ответственность за разработку методов устойчивого управления, которые интегрируют микробные взаимодействия в существующие сельскохозяйственные системы.

7. Выводы

Позитивное взаимодействие между растениями кукурузы и полезными микробами предлагает многообещающее решение для улучшения роста растений и поглощения питательных веществ в сложных условиях окружающей среды. Эти взаимодействия не только потенциально могут повысить экологическую устойчивость производства кукурузы, но и способствовать устойчивости. Полезные микробы вносят свой вклад, производя гормоны, способствующие росту, обеспечивая доступность фосфора, а также улучшая фотосинтез и урожайность зерна. Они также повышают устойчивость растений к таким стрессам, как засуха, засоление и жара, и могут вызывать системную устойчивость. Использование этих микробов для защиты от стресса потенциально может значительно повысить урожайность и продуктивность сельскохозяйственных культур, обеспечивая экономические преимущества фермерам и одновременно потенциально снижая зависимость от химических веществ, тем самым принося пользу окружающей среде.

Вклад автора: АК и СБ разработали эту концепцию. SB написал первоначальный проект. АК, ARD и SP отредактировали и рецензировали эту статью. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Данное исследование не получило внешнего финансирования. Эта работа является результатом заключительного задания курса для аспирантов по взаимодействию растений и микробов.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Рекомендации

1. Чавес-Ариас, СС; Лигаррето-Морено, Джорджия; Рамирес-Годой, А.; Рестрепо-Диас, Х. Реакция кукурузы на вызовы засухи, повышенной дневной температуры и стресса для членистоногих травоядных: физиологический, биохимический и молекулярный взгляд. *Передний. Наука о растениях*. 2021, 12, 702841. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
2. Ньеренда, Х.; Мвангомба, В.; Ньеренда, Э.М. Анализ возможных недостающих звеньев для достижения продовольственной безопасности в Центральной Малави: восприятие фермеров и долгосрочная динамика производства кукурузы (*Zea mays* L.). *Гелион* 2021, 7, e07130. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#) 3. Асиби, А.Е.; Чай, К.; А. Коултер, Дж. Механизмы использования азота кукурузой. *Агрономия* 2019, 9, 775. [\[CrossRef\]](#)
4. Гейт, служба скорой помощи; Эль-Бадри, ОЗ; Ламлом, Сан-Франциско; Али, Его Величество; Сиддики, Миннесота; Гариб, РЮ; Эль-Шейх, Миннесота; Джебриль, Дж.; Абдельсалам, Северная Каролина; Кандил, Э.Э. Кукуруза (*Zea mays* L.) Производительность и эффективность использования азота в зависимости от уровня и времени внесения азота. *Передний. Наука о растениях*. 2022, 13, 941343. [\[CrossRef\]](#)
5. Майта, М.; Малец, К.; Майта, К. Влияние осадков и температуры на производство кукурузы в Чешской Республике. 2002 по 2019. *Науч. Отчет* 2021, 11, 10467. [\[CrossRef\]](#)

6. Абдельгавад, Х.; Зинта, Г.; Хегаб, ММ; Панди, Р.; Асард, Х.; Абуэльсуд, В. Высокая соленость вызывает различный окислительный стресс и антиоксидантные реакции в органах проростков кукурузы. *Передний. Наука о растениях*. 2016, 7, 276. [\[CrossRef\]](#)

7. Шахтман Д.; Лю, В. Молекулярные кусочки загадки взаимодействия между поглощением калия и натрия растениями. *Тенденции растениеводства*. 1999, 4, 281–287. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

8. Чавла, С.; Джайн, С.; Джайн, В. Вызванный засолением окислительный стресс и антиоксидантная система у солеустойчивых и чувствительных к соли сортов Риса (*Oryza sativa* L.). *Дж. Биохимия растений. Биотехнология*. 2011, 22, 27–34. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

9. Корона А.О. Насекомые-вредители кукурузы: Руководство по полевой идентификации; СИММИТ: Мехико, Мексика, 1987 г.

10. Видстрем, Н.В. Роль насекомых и других вредителей растений в загрязнении афлатоксинами кукурузы, хлопка и арахиса — обзор. *Дж. Энвайрон. Квал.* 1979, 8, 5–11. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

11. Шелаке, Р.М.; Праманик, Д.; Ким, Ж.-Ю. Исследование взаимодействий растений и микробов для устойчивого сельского хозяйства в эпоху CRISPR. *Микроорганизмы* 2019, 7, 269. [\[CrossRef\]](#)

12. Рошфор, А.; Симонин М.; Марэ, К.; Гильерм-Эркельбаудт, А.-Ю.; Баррет, М.; Сарниге, А. Передача семян и почвы Микробиота рассады. *mSystems* 2021, 6, e0044621. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)

13. Харман, Г.; Хадка, Р.; Дони, Ф.; Апхофф, Н. Польза для здоровья и продуктивности растений от улучшения микробных симбионтов растений. *Передний. Наука о растениях*. 2021, 11, 610065. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)

14. Воччанте, М.; Грифони, М.; Фузини, Д.; Петруццели, Г.; Франки, Э. Роль ризобактерий, стимулирующих рост растений (PGPR) в Смягчение экологического стресса завода. *Прил. наук*. 2022, 12, 1231. [\[CrossRef\]](#)

15. Зильбер-Розенберг И.; Розенберг, Э. Роль микроорганизмов в эволюции животных и растений: гологеномная теория Эволюция. *ФЭМС Микробиол. Ред.* 2008 г., 32, 723–735. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)

16. Ганеш Дж.; Сингх, В.; Хьюитт, К.; Каундал, А. Исследование ризосферного микробиома местного растения *Ceanothus velutinus* — превосходного ресурса бактерий, стимулирующих рост растений. *Передний. Наука о растениях*. 2022, 13, 979069. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)

17. Ганеш Дж.; Хьюитт, К.; Девкота, Арканзас; Уилсон, Т.; Каундал, А. Растения-продуценты ИУК, стимулирующие рост ризобактерий из *Ceanothus velutinus*, повышают эффективность черенкования и биомассу арабидопсиса. *Передний. Наука о растениях*. 2024, 15, 1374877. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)

18. Ким, К.-Х.; Ли, Б.-М. Влияние изменения климата и засухоустойчивости на рост кукурузы. *Растения* 2023, 12, 3548. [\[CrossRef\]](#)

19. Зийомо, К.; Бернардо, Р. Устойчивость кукурузы к засухе: косвенный отбор через вторичные признаки в сравнении с полногеномным отбором. *Наука о растениеводстве*. 2013, 53, 1269–1275. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

20. Хусейн, ХА; Мужской.; Хусейн, С.; Чен, Ю.; Али, С.; Чжан, С.; Чжан, К.; Ли, Ю.; Сюй, Кью; Ляо, К.; и другие. Интерактивное влияние засухи и теплового стресса на морфо-физиологические характеристики, урожайность, поглощение питательных веществ и окислительный статус гибридов кукурузы. *наук. Отчет* 2019, 9, 3890. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)

21. Зиберс, М.Х.; Слэттери, РА; Йендрек, ЧР; Локк, АМ; Дрэг, Д.; Эйнсворт, Э.А.; Бернаки, С; Орт, Д.Р. Смоделированные волны тепла на репродуктивных стадиях кукурузы изменяют репродуктивный рост, но не имеют длительного эффекта при применении на вегетативных стадиях. *Сельское хозяйство. Экосист. Окружающая среда*. 2017, 240, 162–170. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

22. Нейфф, Н.; Траксел, С.; Валентинуз, Орегон; Балби, Китай; Андраде, Ф.Х. Высокие температуры в период цветения кукурузы: влияние на фотосинтез и урожайность зерна у трех генотипов. *Наука о растениеводстве*. 2016, 56, 2702–2712. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

23. Лобелл, Д.Б.; Бенцигер, М.; Магорокшо, К.; Вивек, Б. Нелинейное тепловое воздействие на африканскую кукурузу, подтвержденное исторической урожайностью Испытания. *Нат. Клим. Чанг.* 2011, 1, 42–45. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

24. Хэтфилд Дж. Повышение температуры оказывает драматическое влияние на рост и урожайность зерна трех гибридов кукурузы. *Сельское хозяйство. Окружающая среда. Летт.* 2016, 1, 150006. [\[CrossRef\]](#)

25. Бёлейн, СК; Лю, П.; Вебстер, А.; Рибейро, К.; Сузуки, М.; Ву, С.; Гуан, Ж.-К.; Стюарт, доктор медицинских наук; Трейси, ВФ; Сетлс, АМ; и другие. Влияние длительного воздействия повышенной температуры на развитие эндосперма *Zea mays* во время налива зерна. *Растение Ж.* 2019, 99, 23–40. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)

26. Чакир Р. Влияние водного стресса на разных стадиях развития на вегетативный и репродуктивный рост кукурузы. *Полевые культуры Рез.* 2004, 89, 1–16. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

27. Хюч, Б.В.; Фауст, Ф.; Юнг, С.; Шуберт, С. Стресс засухи во время цветения кукурузы может вызвать аборт ядра из-за ингибирования Активность Н+ -АТФазы плазматической мембраны . *Дж. Растение Нутр. Почвоведение*. 2024, 187, 321–332. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

28. Аслам, М.; Макбул, Массачусетс; Ченгиз, Р. Стресс засухи у кукурузы (*Zea mays* L.): последствия, механизм устойчивости, глобальные достижения и биологические стратегии улучшения; Springer: Берлин/Гейдельберг, Германия, 2015 г.; ISBN 978-3-319-25442-5.

29. Исаурральде, РК; Томсон, АМ; Морган, Дж.А.; Фэй, Пенсильвания; Полли, Х.В.; Хэтфилд, Дж. Л. Влияние климата на сельское хозяйство: последствия для производства кормов и пастбищ. *Агрон. Дж.* 2011, 103, 371–381. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

30. Габальдон-Леаль, К.; Узббер, Х.; Отеги, Мэн; Слэфер, Джорджия; Ордоньес, РА; Гайзер, Т.; Лорите, Эй-Джей; Руис-Рамос, М.; Эверт, Ф. Моделирование влияния теплового стресса на формирование урожайности кукурузы. *Полевые культуры Рез.* 2016, 198, 226–237. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

31. Сан, Дж.; Ван, Х.; Рен, Х.; Чжао, Б.; Чжан, Дж.; Рен, Б.; Лю, П. Маиз (*Zea mays* L.) Реакция на тепловой стресс: механизмы, нарушающие развитие и гормональный баланс метелок и пыльцы. *Ж. Агрон. Наука о растениеводстве*. 2023, 209, 502–516. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

32. Сингх, В.; Краузе, М.; Сандху, Д.; Сехон, РС; Каундал, А. Прогнозирование устойчивости к соленому стрессу для признаков, связанных с биомассой, у кукурузы (*Zea mays* L.) с использованием полногеномных маркеров. *Геном растения* 2023, 16, e20385. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

33. Фарук, М.; Хусейн, М.; Уэйкил, А.; Сиддик, К. Х. Солевой стресс у кукурузы: последствия, механизмы сопротивления и управление. *Обзор . Агрон. Поддерживать. Дев.* 2015, 35, 461–481. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

34. Гонг, Х.; Чао, Л.; Чжоу, М.; Хонг, М.; Луо, Л.; Ван, Л.; Ин, В.; Цзинвэй, К.; Сунджи, Г.; Фашуй Х. Окислительные повреждения проростков кукурузы, вызванные воздействием сочетания дефицита калия и солевого стресса. Растительная почва 2011, 340, 443–452. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
35. Кая, К.; Ашраф, М.; Дикилитас, М.; Туна, А. Л. Смягчение неблагоприятного воздействия солевого стресса на растения кукурузы путем экзогенного применения индолуксусной кислоты (IAA) и неорганических питательных веществ - полевые испытания. Ауст. Дж. Крп Сай. 2013, 7, 249–254.
36. Катерджи, Н.; ван Хорн, J.W.; Хамди, А.; Карам, Ф.; Маторилли, М. Влияние засоления на водный стресс, рост и урожайность кукурузы и Подсолнух. Сельское хозяйство. Водный менеджер. 1996, 30, 237–249. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
37. Шахзад, М.; Витцель, К.; Зёрб, К.; Мюлинг, К.Х. Связанные с ростом изменения в структуре субклеточных ионов в листьях кукурузы (*Zea mays* L.) в условиях солевого стресса. Ж. Агрон. Наука о растениеводстве. 2012, 198, 46–56. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
38. Аршад, М.; Ранамухаараччи, С.Л.; Ахмад, С.; Наваз, Р.; Кайюм, ММН; Разак, А.; Фаиз, Ф. Изменчивость и корреляция выбранных свойств почвы и урожайности кукурузы под влиянием систем обработки почвы в горной агроэкосистеме. J. Сохранение почвенной воды. 2022, 77, 466–481. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
39. Кумар, Дж.; Аббо, С. Генетика времени цветения нута и ее влияние на продуктивность в полусухих условиях. Адв. Агрон. 2001, 72, 107–138. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
40. Тернер, Н.; Райт, Г.; Сиддик, К. Адаптация зернобобовых (бобовых) к среде с ограниченным количеством воды. Адв. Агрон. 2001, 71, 193–231. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
41. Хан, С.; Анвар, С.; Ашраф, МЮ; Халик, Б.; Сан, М.; Хусейн, С.; Гао, З.; Нур, Х.; Алам, С. Механизмы и адаптация Стратегии повышения жароустойчивости риса. Обзор. Растения 2019, 8, 508. [\[CrossRef\]](#)
42. Слейман, М.Ф.; Аль-Сухайбани, Н.; Али, Н.; Акмаль, М.; Алотаби, М.; Рефай, Ю.; Диндароглу, Т.; Абдул-Ваджид, Х.Х.; Батталья, МЛ Влияние стресса засухи на растения и различные подходы к смягчению его неблагоприятных последствий. Растения 2021, 10, 259. [\[CrossRef\]](#)
43. Чжан Ф.; Ван, П.; Цзоу, Ю.-Н.; Ву, К.-С.; Куча, К. Влияние микоризных грибов на рост корневых волосков и уровень гормонов в стержневых и боковых корнях трехлистного апельсина в условиях засухи. Арх. Агрон. Почвоведение. 2019, 65, 1316–1330. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
44. Блюм, А. Осмотическая корректировка является основным адаптивным двигателем к стрессу от засухи в поддержку растениеводства. Окружающая среда растительной клетки. 2017, 40, 4–10. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
45. Ламауи, М.; Джемо, М.; Датла, Р.; Беккауи, Ф. Жара и засуха, стрессы для сельскохозяйственных культур и подходы к их смягчению. Передний. хим. 2018, 6, 26. [\[CrossRef\]](#)
46. Раджпут, В.Д.; Хариш; Сингх, РК; Верма, КК; Шарма, Л.; Кирос-Фигероа, Франция; Мина, М.; Гур, В.С.; Минкина Т.; Сушкова С.; и другие. Последние разработки в области механизма ферментативной антиоксидантной защиты у растений с особым упором на абиотический стресс. Биология 2021, 10, 267. [\[CrossRef\]](#)
47. Ван, К.; Ян, А.; Инь, Х.; Чжан Дж. Влияние водного стресса на содержание эндогенных гормонов и повреждение клеток кукурузы Саженьцы. Дж. Интегр. Растительная биол. 2008, 50, 427–434. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
48. Джонс, Б.; Гуннерос, ЮАР; Петерссон, СВ; Тарковский, П.; Грэм, Н.; Мэй, С.; Долезал, К.; Сандберг, Г.; Люнг, К. Цитокининовая регуляция синтеза ауксина у арабидопсиса включает гомеостатическую обратную связь, регулируемую посредством передачи сигналов ауксина и цитокинина. Растительная клетка 2010, 22, 2956–2969. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
49. Вайс, Д.; Ори, Н. Механизмы перекрестных помех между гиббереллином и другими гормонами. Физиол растений. 2007, 144, 1240–1246. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
50. Рао, СР; Кайюм, А.; Раззак, А.; Ахмад, М.; Махмуд, И.; Шер, А. Роль внекорневого внесения салициловой кислоты и L- триптофана в засухоустойчивость кукурузы. Дж. Аним. Наука о растениях. 2012, 22, 768–772.
51. Шен, Ю.-Ю.; Ван, Х.-Ф.; Ву, Ф.-К.; Ду, С.-Ю.; Цао, З.; Шан, Ю.; Ван, Х.-Л.; Пэн, СС; Ю, Х.-С.; Чжу, С.-Ю.; и другие. Субъединица Mg-хелатазы Н представляет собой рецептор абсцизовой кислоты. Природа 2006, 443, 823–826. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
52. Хасануззаман, М.; Бхуян, МХМБ; Зульфикар, Ф.; Раза, А.; Мохсин, С.М.; Махмуд, Дж.А.; Фудзита, М.; Фотопулос, В. Активные формы кислорода и антиоксидантная защита растений в условиях абиотического стресса: новый взгляд на решающую роль универсального регулятора защиты. Антиоксиданты 2020, 9, 681. [\[CrossRef\]](#)
53. Сандху, Д.; Каундал, А. Динамика солеустойчивости: молекулярные перспективы. В «Биотехнологиях улучшения сельскохозяйственных культур», том 3: Геномные подходы; Госал С.С., Вани С.Х., ред.; Springer International Publishing: Чам, Швейцария, 2018 г.; стр. 25–40, ISBN 978-3-319-94746-4.
54. Амин И.; Расул, С.; Мир, М.А.; Вани, В.; Масуди, Казахстан; Ахмад, П. Ионный гомеостаз для устойчивости растений к солености: молекулярный анализ Подход. Физиол. Завод 2021, 171, 578–594. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
55. Басу, С.; Кумар, А.; Беназир, И.; Кумар, Г. Переоценка роли ионного гомеостаза в повышении солеустойчивости сельскохозяйственных растений. Физиол. Растение. 2021, 171, 502–519. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
56. Чжоу, Х.; Ли, Дж.; Ван, Ю.; Лян, Х.; Чжан, М.; Лу, М.; Го, Ю.; Цинь, Ф.; Цзян, К. Классический путь SOS дает естественные Изменение солеустойчивости кукурузы. Новый Фитол. 2022, 236, 479–494. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
57. Ян, Ю.; Го, Ю. Выяснение молекулярных механизмов, опосредующих реакцию растений на солевой стресс. Новый Фитол. 2018, 217, 523–539. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
58. Цао, Ю.; Ван, Ю.; Гуй, К.; Нгуво, К.Дж.; Ма, Л.; Ван, К.; Шен, Кью; Чжан, Р.; Гао, Х. Полезные ризобактерии-триггеры вызывают системную устойчивость кукурузы к стеблевой гнили гиббереллы посредством передачи сигналов кальция. Мол. Взаимодействие с растительными микробами. 2023, 36, 516–528. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)

59. Яо, Х.; Хори, Т.; Сюэ, С.; Люнг, Х.-Ю.; Кацухара, М.; Бродский, Д.Э.; Ву, Ю.; Шредер, Дж. И. Дифференциальная селективность транспорта натрия и калия транспортерами OsNKT2;1 и OsNKT2;2 риса в растительных клетках. Физиол растений. 2009, 152, 341–355. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)

60. Зивчак, М.; Брестик, М.; Ситар, О. Осмотическая адаптация и адаптация растений к стрессу от засухи. В книге «Толерантность растений к засухе», Том 1: Физиология и биохимия; Хоссейн, М.А., Вани, С.Х., Бхаттачарджи, С., Берритт, Д.Д., Тран, Л.-СП, ред.; Springer International Publishing: Чам, Швейцария, 2016 г.; стр. 105–143, ISBN 978-3-319-28899-4.

61. Суббарао, Г.В.; Нам, Нью-Хэмпшир; Чаухан, Ю.С.; Йохансен, К. Осмотическая регулировка, водные отношения и ремобилизация углеводов у голубиногo гороха в условиях дефицита воды. Дж. Физиол растений. 2000, 157, 651–659. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

62. Гош, Великобритания; Ислам, Миннесота; Сиддики, Миннесота; Хан, MAR. Понимание роли осмолитов в адаптации растений к изменяющейся окружающей среде: обзор потенциального механизма. Сигнал завода. Поведение. 2021, 16, 1913306. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)

63. Янси, РН-совместимые и противодействующие растворенные вещества: защита клеток от Мертвого моря до глубоководных. наук. Прог. 2004, 87, 1–24. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

64. Ашраф, М.; Фулад, М.Р. Роль глицина-бетаина и пролина в повышении устойчивости растений к абиотическому стрессу. Окружающая среда. Эксп. Бот. 2007, 59, 206–216. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

65. Йошиба, Ю.; Киёсуэ, Т.; Накашима, К.; Ямагучи-Синозаки, К.; Шинозаки, К. Регулирование уровня пролина как осмолита Растения, испытывающие водный стресс. Физиол растительной клетки. 1997, 38, 1095–1102. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

66. Роза, М.; Прадо, К.; Податца, Г.; Интердонато, Р.; Гонсалес, Х.А.; Хилал, М.; Прадо, Ф. Е. Растворимые сахара — метаболизм, восприятие и абиотический стресс. Сигнал завода. Поведение. 2009, 4, 388–393. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

67. Лю, Ф.-Ф.; Джи, Л.; Чжан, Л.; Донг, Х.-У.; Сан, Ю. Молекулярная основа стабильности белков, индуцированной полиолом, выявленная с помощью молекулярных исследований. Динамическое моделирование. Дж. Хим. Физ. 2010, 132, 225103. [\[CrossRef\]](#)

68. Нджеру, Ф.; Вамбуа, А.; Муге, Э.; Хэсарт, Г.; Гетtemanс, Дж.; Мисинзо, Г. Основные биотические стрессы, влияющие на производство кукурузы в Кении, и их последствия для продовольственной безопасности. PeerJ 2023, 11, e15685. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

69. Лодха, Т.Д.; Хембрам, П.; Нитил Теп, Дж. Б. Протеомика: успешный подход к пониманию молекулярного механизма Взаимодействие растений и патогенов. Являюсь. Дж. Наука о растениях. 2013, 2013, 32899. [\[CrossRef\]](#)

70. Гонг, Ф.; Ян, Л.; Тай, Ф.; Ху, Х.; Ван, В. «Омикс» реакции кукурузы на стресс для устойчивого производства продуктов питания: возможности и вызовы. Омикс Дж. Интегр. Биол. 2014, 18, 714–732. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

71. Басу, СК; Датта, М.; Гоял, А.; Бхоумик, ПК; Кумар, Дж.; Нанди, С.; Скальузи, С.М.; Прасад, Р. Генетически модифицированное растение Ответ на следующую зеленую революцию? ГМ-культуры 2010, 1, 68–79. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

72. Хунг, Х.-Ю.; Шеннон, LM; Тиан, Ф.; Брэдбери, Пиджей; Чен, К.; Флинт-Гарсия, ЮАР; Макмаллен, доктор медицины; Уэр, Д.; Баклер, ЕС; Добли, Дж. Ф.; и другие. ZmCCT и генетическая основа адаптации к длине светового дня, лежащая в основе распространения кукурузы после одомашнивания. Учеб. Натл. акад. наук. США 2012, 109, E1913–E1921. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

73. Жассо-Роблес, Финляндия; Хименес-Бремонт, JF; Бесерра-Флора, А.; Хуарес-Монтель, М.; Гонсалес, Мэн; Пикенстейн, Флорида; Гарсиа Де Ла Круз, РФ; Родригес-Кесслер, М. Ингибирование активности полиаминоксидазы влияет на развитие опухоли во время взаимодействия кукурузы и Ustilago maydis. Физиол растений. Биохим. 2016, 102, 115–124. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

74. Такахаша, Ю.; Берберих, Т.; Миядзаки, А.; Со, С.; Охаси, Ю.; Кусано, Т. Передача сигнала спермином в табаке: активация митоген-активируемых протеинкиназ спермином опосредована через митохондриальную дисфункцию. Планта Дж. 2003, 36, 820–829. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)

75. Херридж, Д.Ф.; Народы, МБ; Бодди, Р.М. Глобальные последствия биологической фиксации азота в сельскохозяйственных системах. Растительная почва 2008, 311, 1–18. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

76. Народы, МБ; Брокуэлл, Дж.; Херридж, DF; Рочестер, Ай-Джей; Алвес, БЖР; Уркиага, С.; Бодди, Р.М.; Дакора, Флорида; Бхаттарай, С.; Маски, СЛ; и другие. Вклад азотфиксирующих бобовых культур в продуктивность сельскохозяйственных систем. Симбиоз 2009, 48, 1–17. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

77. Акияма, К.; Хаяши, Х. Стриголактоны: химические сигналы для грибов-симбионтов и паразитических сорняков в корнях растений. Анна. Бот. 2006, 97, 925–931. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

78. Люсидо, А.; Андраде, Ф.; Басалло, О.; Элейва, А.; Марин-Сангвино, А.; Вилаприньо, Э.; Соррибас, А.; Алвес, Р. Моделирование эффектов Уровни стриголактона в архитектуре корневой системы кукурузы. Передний. Наука о растениях. 2024, 14, 1329556. [\[CrossRef\]](#)

79. Гуань, Д.К.; Кох, К.Э.; Сузуки, М.; Ву, С.; Латшоу, С.; Петруфф, Т.; Гуле, К.; Клее, НД; Маккарти, Д.Р. Разнообразные роли передачи сигналов стриголактона в архитектуре кукурузы и разъединение подсети, специфичной для ветвления. Физиол растений. 2012, 160, 1303–1317. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

80. Жанр, А.; Шабо, М.; Тиммерс, Т.; Бонфанте, П.; Баркер, Д.Г. Арбускулярные микоризные грибы вызывают новый внутриклеточный аппарат в клетках эпидермиса корня Medicago truncatula перед инфицированием. Растительная клетка 2005, 17, 3489–3499. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

81. Мортье, Э.; Мунье, А.; Креппак, Дж.; Мартин-Лоран, Ф.; Рекорбет, Г.; Ламотт, О. Доказательства того, что общая арбускулярная микоризная сеть смягчает нехватку фосфатов у взаимосвязанных саженцев грецкого ореха и растений кукурузы. Передний. Наука о растениях. 2023, 14, 1206047. [\[CrossRef\]](#)

82. Ван, К.; Лю, М.; Ван, З.; Ли, Дж.; Лю, К.; Хуанг, Д. Роль арбускулярного микоризного симбиоза в абиотическом стрессе растений. Передний. Микробиол. 2024, 14, 1323881. [\[CrossRef\]](#)

83. Хуэй, Дж.; Ан, Х.; Ли, Э.; Нойхойзер, Б.; Людвиг, У.; Ву, Х.; Шульце, В.; Чен, Ф.; Фэн, Г.; Ламберс, Х.; и другие. Специфический для микоризы переносчик аммония ZmAMT3;1 опосредует зависимое от микоризы поглощение азота в корнях кукурузы. Растительная клетка 2022, 34, 4066–4087. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

84. Ченг, З.; Мэн, Л.; Инь, Т.; Ли, Ю.; Чжан, Ю.; Ли, С. Изменения в разнообразии почвенных ризобий и их влияние на симбиотическую эффективность сои, совмещенной с кукурузой. *Агрономия* 2023, 13, 997. [\[CrossRef\]](#)
85. Лукас, ГМР; Карлос, ХК; Фабио, LCM; Густаво, В.М. *Azospirillum* spp. Потенциал роста и урожайности кукурузы. *Афр. Дж. Биотехнология*. 2018, 17, 574–585. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
86. Хаят Р.; Ахмед, И.; Шейрдил, Р.А. Обзор ризобактерий, стимулирующих рост растений (PGPR) для устойчивого сельского хозяйства. В *растениеводстве для улучшения сельского хозяйства*; Ашраф М., Озюрк М., Ахмад МСА, Аксой А., ред.; Springer: Дордрехт, Нидерланды, 2012 г.; стр. 557–579, ISBN 978-94-007-4115-7.
87. Гарсия де Саламоне, Айленд; Дёберейнер, Дж.; Уркиага, С.; Бодди, Р.М. Биологическая фиксация азота в ассоциациях генотипов штамма азоспирилл и кукурузы, оцененных с помощью метода разбавления изотопа ^{15}N . *Биол. Плодородный. Почвы* 1996, 23, 249–256. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
88. Дейнзе, А.В.; Самора, П.; Дело, П.-М.; Хайтманн, К.; Джаяраман, Д.; Раджасекар, С.; Грэм, Д.; Маэда, Дж.; Гибсон, Д.; Шварц, К.Д.; и другие. Фиксация азота у сортов кукурузы ландрас поддерживается diaзотрофной микробиотой, связанной со слизью. *Плос Биол.* 2018, 16, e2006352. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
89. Сюй, Л.; Ван, А.; Ван, Дж.; Вэй, К.; Чжан, W. *Piriformospora indica* придает *Zea mays* L. устойчивость к засухе посредством улучшения антиоксидантной активности и экспрессии генов, связанных с засухой. *Кроп Дж.* 2017, 5, 251–258. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
90. Али, Б.; Хафиз, А.; Африди, М.С.; Джавед, Массачусетс; Сумайра; Сулеман, Ф.; Надим, М.; Али, С.; Альвахиди, MS; Эльших, М.С.; и другие. Бактериально-опосредованная устойчивость кукурузы к стрессу к засолению (*Zea mays* L.): удачный путь к устойчивому сельскому хозяйству. *АСУ Омга* 2023, 8, 20471–20487. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
91. Райалс, Дж.; Нойеншвандер, У.; Уиллитс, М.; Молина, А.; Штайнер, Х.; Хант, М. Системная приобретенная резистентность. *Растительная клетка* 1996, 8, 1809–1819. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
92. Ю, Ю.; Гуй, Ю.; Ли, З.; Цзян, К.; Го, Дж.; Нью, Д. Индуцированная системная устойчивость для улучшения иммунитета растений с помощью полезных микробов. *Растения* 2022, 11, 386. [\[CrossRef\]](#)
93. Баккер, ПАММ; Дорнбос, РФ; Замиудис, К.; Берендсен, РЛ; Питерс, «Системная резистентность, индуцированная СМ», и Ризосферный микробиом. *Растительный патол. Дж.* 2013, 29, 136–143. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
94. Сараванакумар, К.; Фан, Л.; Фу, К.; Ю, Ц.; Ван, М.; Ся, Х.; Сан, Дж.; Ли, Ю.; Чен, Дж. Целлюлаза из *Trichoderma harzianum* взаимодействует с корнями и вызывает системную устойчивость кукурузы к болезням листьев. *наук. Отчет* 2016, 6, 35543. [\[CrossRef\]](#)
95. Рохас-Тапиас, Д.; Морено-Гальван, А.; Пардо-Диас, С.; Обандо, М.; Ривера, Д.; Бонилла, Р. Влияние инокуляции бактериями, стимулирующими рост растений (PGPB), на смягчение солевого стресса у кукурузы (*Zea mays*). *Прил. Почвенная Экол.* 2012, 61, 264–272. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
96. Насим, Х.; Бано, А. Роль ризобактерий, способствующих росту растений, и их экзополисахаридов в устойчивости к засухе. *Кукуруза. Дж. Плант Интеракт.* 2014, 9, 689–701. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
97. Гоу, В.; Тиан, Л.; Руан, З.; Чжэн, П.; Чен, Ф.; Чжан, Л.; Кюи, З.; Чжэн, П.; Ли, З.; Гао, М.; и другие. Накопление холина и глицинабетаина и устойчивость к засухе, индуцированные у кукурузы (*Zea mays*) тремя штаммами ризобактерий, стимулирующих рост растений (PGPR). *Пак. Дж. Бот.* 2015, 47, 581–586.
98. Хуан, Х.-Ф.; Чжоу, Д.; Лапсанский, Э.; Рирдон, К.; Го, Дж.; Андалес, М.; Виванко, Дж.; Мантер, Д. Мицуария sp. и *Burkholderia* sp. из ризосферы *Arabidopsis* повышает засухоустойчивость *Arabidopsis thaliana* и кукурузы (*Zea mays* L.). *Почва растений* 2017, 419, 523–539. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
99. Морено-Гальван А.; Кортес-Патиньо, С.; Ромеро-Пердомо, Ф.; Урибе-Велес, Д.; Башан, Ю.; Бонилла, Р. Накопление пролина и активность глутатионредуктазы, индуцированные засухоустойчивыми ризобактериями, как потенциальные механизмы облегчения стресса, вызванного засухой, у гусеницы. *Прил. Почвенная Экол.* 2020, 147, 103367. [\[CrossRef\]](#)
100. Молина-Ромеро, Д.; Баэз, А.; Кинтеро-Эрнандес, В.; Кастаньеда-Лучио, М.; Фуэнтес-Рамирес, Луизиана; Бустильос-Кристалес, доктор медицинских наук; Родригес-Андраде, О.; Моралес-Гарсия, Ю.В.; Мунив, А.; Муньюс-Рохас, Дж. Совместимая бактериальная смесь, устойчивая к высыханию, улучшает рост растений кукурузы. *PLoS ONE* 2017, 12, e0187913. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
101. Бано, К.; Ильяс, Н.; Бано, А.; Зафар, Н.; Акрам, А.; Хасан, Ф.У. Влияние инокуляции азоспирилл на кукурузу (*Zea mays* L.) при Стресс от засухи. *Пак. Дж. Бот.* 2013, 45, 13–20.
102. Козн, А.; Травалья, К.; Боттини, Р.; Пикколи, П. Участие абсцизовой кислоты и гиббереллинов, продуцируемых эндوفитными азоспириллами, в смягчении последствий засухи на кукурузе. *Ботаника* 2009, 87, 455–462. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
103. Вардхараджула, С.; Шайк, З.А.; Гровер, М.; Редди, Дж.; Венкатешварлу, Б. Рост засухоустойчивых растений, способствующий росту *Bacillus* spp.: Влияние на рост, осмолиты и антиоксидантный статус кукурузы в условиях засушливого стресса. *Дж. Плант Интеракт.* 2011, 6, 1–14. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
104. Навид, М.; Миттер, Б.; Райхенауэр, Т.Г.; Вечорек, К.; Сессич, А. Повышение устойчивости кукурузы к стрессу засухи посредством эндوفитной колонизации *Burkholderia phytofirmans* PsjN и *Enterobacter* sp. ФД17. *Окружающая среда. Эксп. Бот.* 2014, 97, 30–39. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
105. Кирог, Г.; Эриче, Г.; Дин, Л.; Шомон, Ф.; Арока, Р.; Руис-Лозано, Дж. М. Арбускулярный микоризный симбиоз регулирует активность аквапоринов и улучшает водопроницаемость корневых клеток у растений кукурузы, подвергающихся водному стрессу. *Окружающая среда растительной клетки.* 2019, 42, 2274–2290. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
106. Ясмин, Х.; Ношин А.; Наз, Р.; Бано, А.; Кейани, Р. PGPR-опосредованная индукция толерантности к засухе у Кукуруза (*Zea mays* L.). *Дж. Плант Интеракт.* 2017, 12, 567–578. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
107. Кура, Х.А.; Франц, доктор медицинских наук; Философия, JE; Балештрассе, KB; Бургень, Л.Е. Инокуляция *Azospirillum* sp. и *Herbaspirillum* sp. Бактерии повышают устойчивость кукурузы к стрессу, вызванному засухой. *Микроорганизмы* 2017, 5, 41. [\[CrossRef\]](#)

108. Кришнамурти, Р.; Ким, К.; Субраманиан, П.; Сентилкумар, М.; Анандхам, Р.; Са, Т. Арбускулярные микоризные грибы и ассоциированные бактерии, выделенные из засоленной почвы, повышают толерантность кукурузы к засолению в прибрежных мелиоративных почвах. *Сельское хозяйство. Экосист. Окружающая среда*. 2016, 231, 233–239. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
109. Бано, А.; Фатима, М. Солеустойчивость *Zea mays* (L). После инокуляции *Rhizobium* и *Pseudomonas*. *Биол. Плодородный. Почвы* 2009, 45, 405–413. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
110. Надим, С.М.; Захир, З.А.; Навид, М.; Аршад, М. Ризобактерии, содержащие АСС-деаминазу, повышают солеустойчивость кукурузы, выращенной на засоленных полях. *Может. Дж. Микробиол.* 2009, 55, 1302–1309. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
111. Шэн, М.; Тан, М.; Чжан, Ф.; Хуанг, Ю. Влияние арбускулярной микоризы на органические растворы в листьях кукурузы под солью Стресс. *Микориза* 2011, 21, 423–430. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
112. Чен, Л.; Лю, Ю.; Ву, Г.; Кимани, В.; Шен, Кью; Чжан, Н.; Чжан Р. Индуцированная солеустойчивость кукурузы путем инокуляции ризосферы *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9. *Физиол. Растение*. 2016, 158, 34–44. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
113. Ли, Х.; Сан, П.; Чжан, Ю.; Джин, К.; Гуан, К. Новый штамм PGPR *Kocuria rhizophila* Y1 повышает толерантность к солевому стрессу у кукурузы путем регулирования уровня фитогормонов, усвоения питательных веществ, окислительно-восстановительного потенциала, ионного гомеостаза, фотосинтетической способности и экспрессии генов, реагирующих на стресс. *Окружающая среда. Эксп. Бот.* 2020, 174, 104023. [\[CrossRef\]](#)
114. Ахмад, М.; Имтиаз, М.; Наваз, М.С.; Мубин, Ф.; Сарвар, Ю.; Хаят, М.; Асиф, М.; Накви, РЗ; Ахмад, М.; Имран, А. Консорциум термотолерантных PGPR ВЗР модулирует физико-биохимические и молекулярные механизмы для повышения жароустойчивости кукурузы во время раннего вегетативного роста. *Анна. Микробиол.* 2023, 73, 34. [\[CrossRef\]](#)
115. Матур, С.; Агнихотри, Р.; Шарма, член парламента; Редди, VR; Джаджу, А. Влияние высокотемпературного стресса на физиологические свойства растений и Микоризный симбиоз у растений кукурузы. *J. Fungi* 2021, 7, 867. [\[CrossRef\]](#)
116. Чжу, Х.; Песня, Ф.-Б.; Сюй, Х.-В. Арбускулярная микориза улучшает низкотемпературный стресс у кукурузы за счет изменений в воде-хозяине Статус и фотосинтез. *Растительная почва* 2010, 331, 129–137. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
117. Матур, С.; Джаджу, А. Арбускулярные микоризные грибы защищают растения кукурузы от высокотемпературного стресса путем регулирования фотосинтеза. *Тема II Неоднородность. Индийский урожай сельскохозяйственных культур*. 2020, 143, 111934. [\[CrossRef\]](#)

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельному автору(ам) и соавторам(ам), а не MDPI и/или редактору(ам). MDPI и/или редактор(ы) не несут ответственности за любой вред людям или имуществу, возникший в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.