

DOI

УДК 631.8

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭНДОФИТНЫХ БАКТЕРИЙ РОДА *BACILLUS* НА РОСТ И СТРЕССОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРОРОСТКОВ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ И СОИ

Г. Х. Шаймуллина, Р. И. Сафин, О. А. Егорова, А. Р. Валиев, М. Н. Калимуллин

Реферат. Исследования проводили с целью выявления возможности применения штаммов эндофитных бактерий рода *Bacillus* на однодольных и двудольных растениях для повышения их засухоустойчивости. Определяли показатели всхожести семян, длину корней, уровень перекисного окисления липидов, содержание фотосинтетических пигментов и свободного пролина. Схема вегетационных опытов предусматривала моделирование 30%-ной засухи на песке и предпосевную обработку семян яровой пшеницы сорта Йолдыз и сои сорта Султана эндофитными бактериями *Bacillus subtilis* KS-55 AU, *Bacillus cereus* KS-56 AU, *Bacillus pumilus* KS-57 AU, *Bacillus megaterium* KS-58 AU, *Bacillus cereus* KS-59 AU, *Bacillus megaterium* KS-60 AU и *Bacillus pumilus* KS-61 AU. Бактерии лучше стимулировали рост корней при использовании титра 1×10^6 клеток в 1 мл препарата (прибавка на сое с *Bacillus subtilis* KS-55 AU и *Bacillus megaterium* KS-60 AU составила 0,6 см, на пшенице с *Bacillus cereus* KS-56 AU, *Bacillus cereus* KS-59 AU и *Bacillus pumilus* KS-61 AU – 0,4 см). На пшенице особо выделялся штамм *Bacillus subtilis* KS-55 AU, обработка которым способствовала повышению всхожести на 30%, снижению уровня перекисного окисления липидов на 46%, увеличению количества свободного пролина на 148%, фотосинтетических пигментов – на 6%, относительно контрольного варианта. На растениях сои этот штамм способствовал повышению всхожести на 40%, обработка *Bacillus cereus* KS-59 AU приводила к снижению уровня перекисного окисления липидов на 47%, накоплению пролина – на 73%, *Bacillus pumilus* KS-61 AU повышал содержание суммарного хлорофилла на 141%, относительно контрольного варианта. Таким образом, можно заключить, что указанные штаммы эндофитных бактерий улучшают рост и развитие проростков яровой пшеницы и сои, а также служат индукторами устойчивости культур к почвенной засухе.

Ключевые слова: яровая пшеница, соя, эндофитные бактерии рода *Bacillus*, засуха, перекисное окисление липидов, пролин, хлорофилл.

Введение. Сельскохозяйственные культуры в течение вегетационного периода постоянно испытывают действие стрессов различной природы [1]. Один из наиболее распространенных стрессов в мире – засуха, для региона Поволжья достаточно частое явление – почвенная засуха [2, 3, 4]. Уровень устойчивости растений к этому неблагоприятному фактору среды может зависеть от различных причин, начиная с комплекса защитных механизмов самих растений и заканчивая интенсивностью и продолжительностью воздействия стресса [5, 6, 7]. Определенный вклад в стрессоустойчивость культур может вносить обработка семян и надземной части растений полезными рост-стимулирующими бактериями (PGPB – plant growth-promoting bacteria) [8]. Многочисленные положительные свойства использования эндофитных бактерий – обширной группы непатогенных микроорганизмов, обитающих внутри растений – показаны в работах исследователей по всему миру [9, 10, 11]. Преимуществом применения конкретно этих бактерий в растениеводстве считают их способность проникать непосредственно в ткани растений, корректируя своими метаболитами их рост и развитие, защиту от болезней и стрессов, что в конечном итоге приводит к повышению продуктивности [12]. Поэтому количество зарегистрированных и разрешенных к применению на территории РФ препаратов на основе таких «полезных» микроорганизмов ежегодно увеличивается [13]. Однако большинство препаратов представлено биологическими фунгицидами, которые применяют для борьбы

с фитопатогенными грибами [14, 15]. В то же время механизмы протекторного действия эндофитных бактерий на растения в условиях стрессов абиотической природы полностью не расшифрованы, а сведений для комплексного анализа физиолого-биохимических маркеров положительного влияния эндофитных бактерий на различные группы растений при дефиците влаги в почве недостаточно [16].

Цель исследования – выявление особенностей ответа проростков яровой пшеницы и сои на обработку семян эндофитными бактериями рода *Bacillus* при почвенной засухе и выделение биохимических маркеров их позитивного действия на растения.

Условия, материалы и методы. Поскольку большинство изолированных нами из семян и корней ярового ячменя и пшеницы местной (ФГБУН ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук») и зарубежной селекции эндофитных бактерий относились к роду *Bacillus*, в работе рассматривали штаммы этого таксона – *B. subtilis* KS-55 AU, *B. cereus* KS-56 AU, *B. pumilus* KS-57 AU, *B. megaterium* KS-58 AU, *B. cereus* KS-59 AU, *B. megaterium* KS-60 AU и *B. pumilus* KS-61 AU.

На начальном этапе изучали влияние разного титра клеток бактерий на рост корней однодольных (яровая пшеница сорта Йолдыз) и двудольных (соя сорта Султана) культур. Для этого подсчитывали количество клеток микроорганизмов в инокуляте с использованием камеры Горяева. Затем семена обрабатывали 75%-ным этанолом, многократно промывали стерильной дистиллированной водой и

замачивали на 24 ч в суспензии бактериальных клеток с титром 1×10^5 клеток/мл (кл./мл), 1×10^6 кл./мл и 1×10^7 кл./мл. В контрольном варианте семена обрабатывали стерильной водопроводной водой. В качестве биологического (положительного) контроля был выбран эндофит *Bacillus mojavensis* PS17, выделенный из семян пшеницы [17]. Длину корней учитывали через 3 суток.

После определения рост-стимулирующего титра клеток моделировали условия почвенной засухи для выявления протекторного действия эндофитов рода *Bacillus* на растения при дефиците влаги. Семена яровой пшеницы сорта Йолдыз в количестве 20 шт. и сои сорта Султана в количестве 10 шт. высевали в вегетационные сосуды объемом 5 л (повторные трехкратная), заполненные стерильным кварцевым песком, увлажняли питательным растительным раствором PNS (plants nutrient solution) [18] и проращивали в течение 14-и суток в климатической камере НРР 750 Memmet (Германия) при световом периоде 16 ч и температуре $+23$ °С. Влажность субстрата поддерживали весовым методом на уровне 30% от полной влагоемкости (ПВ). В ходе опыта фиксировали всхожесть семян, длину надземной части и корневой системы.

Об уровне стрессоустойчивости растений судили по накоплению продукта перекисного окисления липидов (ПОЛ) – малонового

диальдегида (МДА) [19]. Помимо этого, определяли содержание свободного пролина с использованием кислого нингидринового реактива [20] и экстрагировали фотосинтетические пигменты (хлорофилл *a* и *b*) 96%-ным этиловым спиртом [21].

Оптическую плотность растворов определяли на планшетном спектрофотометре SpectroStar nano.

Закладку экспериментов и измерения осуществляли в нескольких (не менее трёх) биологических и аналитических повторностях. Результаты обрабатывали в программе Excel с вычислением среднего значения и стандартного отклонения. Для выявления значимых различий между контрольным и испытываемыми вариантами использовали *t*-критерий Стьюдента (различия оценивали при уровне значимости $p < 0,05$).

Результаты и обсуждение. На начальном этапе все изучаемые штаммы эндофитных бактерий продемонстрировали стимулирующую активность на проростках высших растений. Наибольшее увеличение длины корней сои (на 0,6 см), относительно контроля, отмечали в вариантах с *B. subtilis* KS-55 AU и *B. megaterium* KS-60 AU (табл. 1). На проростках яровой пшеницы наибольшую прибавку (0,4 см) отмечали в вариантах с *B. cereus* KS-56 AU, *B. cereus* KS-59 AU и *B. pumilus* KS-61 AU (табл. 2).

Таблица 1 – Влияние разного титра клеток эндофитных бактерий на длину корней сои, см

Вариант	Титр бактериальной суспензии, кл./мл		
	1×10^5	1×10^6	1×10^7
Контроль		1,6±0,1	
KS-55 AU	1,6±0,1	2,2±0,2*	1,8±0,2
KS-56 AU	1,6±0,2	2,0±0,2*	1,8±0,1
KS-57 AU	1,6±0,1	1,7±0,2	1,8±0,1
KS-58 AU	1,7±0,2	1,7±0,1	1,8±0,1
KS-59 AU	1,7±0,2	2,1±0,1*	2,0±0,1*
KS-60 AU	1,8±0,1	2,2±0,1*	2,0±0,2*
KS-61 AU	1,6±0,2	1,9±0,1*	1,6±0,3
PS17	2,0±0,1*	2,1±0,3*	1,6±0,1

* (здесь и в табл. 2) различия между контрольным и испытываемыми вариантами достоверны при уровне значимости $p < 0,05$.

Таблица 2 – Влияние разного титра клеток эндофитных бактерий на длину корней яровой пшеницы, см

Вариант	Титр бактериальной суспензии, кл./мл		
	1×10^5	1×10^6	1×10^7
Контроль		3,5±0,1	
KS-55 AU	3,5±0,2	3,8±0,1*	3,6±0,1
KS-56 AU	3,6±0,2	3,9±0,1*	3,6±0,1
KS-57 AU	3,5±0,1	3,5±0,2	3,8±0,1*
KS-58 AU	3,5±0,1	3,7±0,2	3,5±0,1
KS-59 AU	3,5±0,2	3,9±0,1*	3,8±0,2
KS-60 AU	3,6±0,1	3,7±0,1	3,6±0,1
KS-61 AU	3,5±0,1	3,9±0,2*	3,5±0,1
PS17	3,5±0,2	3,8±0,1*	3,7±0,1

Строгой корреляции между увеличением титра клеток бактерий и изменением длины корней не наблюдали. Но при использовании

всех исследуемых штаммов бактерий, кроме *B. pumilus* KS-57 AU и *B. megaterium* KS-58 AU, наилучший стимулирующий

эффект отмечали при титре 1×10^6 кл./мл. Поэтому для дальнейшего изучения влияния эндофитов рода *Vacillus* на засухоустойчивость растений семена обрабатывали инокулятом в концентрации 1×10^6 кл./мл. В условиях моделируемой почвенной засухи предпосевная обработка эндофитными бактериями способствовала сохранению всхожести семян у яровой пшеницы на уровне 80...100% (исключая

обработку штаммом *B. megaterium* KS-60 AU), у сои – 70...100% (кроме штаммов *B. pumilus* KS-57 AU и *B. megaterium* KS-58 AU).

Тогда как без их использования величины этих показателей составляли соответственно 70% и 60% (табл. 3). Вероятно, благодаря бактериальной колонизации поверхности, семена получают преимущества при прорастании в неблагоприятных условиях.

Таблица 3 – Всхожесть семян яровой пшеницы и сои в условиях 30% почвенной засухи, %

Вариант	Всхожесть семян, %	
	яровая пшеница	соя
Контроль	70	60
KS-55 AU	100	100
KS-56 AU	100	70
KS-57 AU	100	60
KS-58 AU	80	60
KS-59 AU	100	80
KS-60 AU	70	70
KS-61 AU	100	80
PS17	90	100

Кроме всхожести, в вариантах с яровой пшеницей, обработанных штаммами *B. subtilis* KS-55 AU, *B. cereus* KS-59 AU и *B. pumilus* KS-61 AU, зафиксирован наибольший прирост корня – на 23 мм, на 20 мм и на 16 мм соответственно, относительно контрольного варианта. Похожую тенденцию

наблюдали по длине стебля.

После обработки *B. subtilis* KS-55 AU у яровой пшеницы она увеличивалась, по сравнению с контролем, на 17 мм, *B. megaterium* KS-58 – на 10 мм, *B. cereus* KS-59 AU – на 12 мм, *B. pumilus* KS-61 AU – на 24 мм (рис. 1).

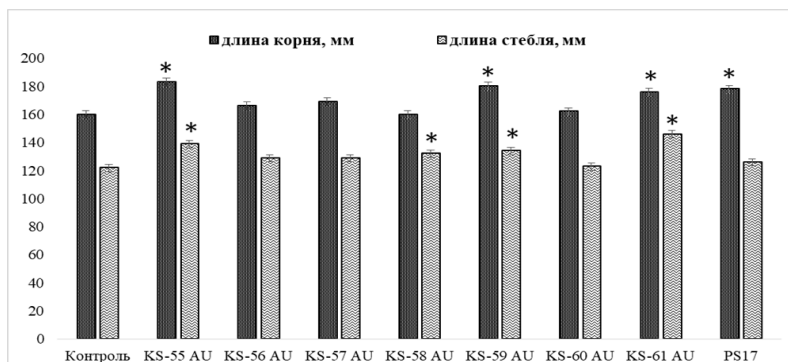


Рис. 1 – Длина проростков яровой пшеницы в условиях 30% почвенной засухи *(здесь и на рис. 2) различия между контрольным и испытываемыми вариантами достоверны при уровне значимости $p < 0,05$.

Практически аналогичную картину отмечали на проростках сои. Длина корня после обработки штаммами *B. subtilis* KS-55 AU увеличивалась на 29 мм, *B. cereus* KS-59 AU – на 13 мм, *B. pumilus* KS-61 AU – на 35 мм.

Длина стебля в варианте со штаммом *B. subtilis* KS-55 AU возрастала на 19 мм, *B. pumilus* KS-57 AU – на 14 мм, *B. cereus* KS-59 AU – на 15 мм, *B. pumilus* KS-61 AU – на 2 мм (рис. 2).

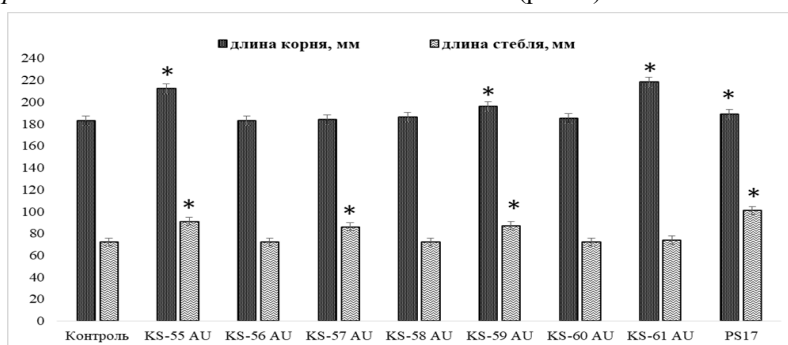


Рис. 2 – Длина проростков сои в условиях 30% почвенной засухи

Такие ответные реакции, в частности со стороны корневых систем, на инокуляцию бактериями рода *Bacillus* могут быть связаны с синтезом индолил-3-уксусной кислоты (ИУК). Так, по данным О. В. Ласточкиной [22], в условиях засухи *B. subtilis* 104 стимулировал процессы образования и роста корней пшеницы благодаря индукции этого гормона ауксинового ряда.

Очевидно, что при засухе происходит нарушение нормального течения физиологических, биохимических процессов внутри растений. Одно из них – перекисное окисление липидов (ПОЛ) клеточных мембран,

вызываемое избыточным количеством активных форм кислорода (АФК) [23]. Важным признаком их повреждения считают накопление малонового диальдегида (МДА).

Содержание МДА в листьях опытных вариантов со штаммами, по сравнению с контролем, снижалось (табл. 4, табл. 5). При обработке пшеницы самое значительное уменьшение величины этого показателя (на 46%), которое свидетельствует о лучшей целостности мембран при засухе, отмечено в варианте со штаммом *B. subtilis* KS-55 AU, при обработке сои (на 47%) – со штаммом *B. cereus* KS-59 AU.

Таблица 4 – Влияние эндофитных бактерий на содержание МДА, свободного пролина и количество фотосинтетических пигментов в яровой пшенице в условиях 30% почвенной засухи

Вариант	Содержание МДА ммоль/г сырой массы	Пролин, мг/г сырой массы	Хлорофилл <i>a</i> и <i>b</i> , мг/г сырой массы
Контроль	18,81±0,04	33,21±0,03	1,464±0,002
KS-55 AU	10,22±0,02*	82,49±0,07*	1,550±0,003*
KS-56 AU	16,37±0,04*	38,53±0,07*	1,465±0,010
KS-57 AU	14,48±0,02*	37,32±0,08*	1,466±0,007
KS-58 AU	17,15±0,03*	40,94±0,02*	1,469±0,009
KS-59 AU	13,70±0,01*	50,94±0,05*	1,540±0,002*
KS-60 AU	17,57±0,04*	34,66±0,02*	1,452±0,007*
KS-61 AU	15,54±0,02*	49,49±0,02*	1,507±0,003*
PS17	14,36±0,01*	95,05±0,08*	1,746±0,004*

Таблица 5 – Влияние эндофитных бактерий на содержание МДА, свободного пролина и количество фотосинтетических пигментов в сое в условиях 30% почвенной засухи

Вариант	Содержание МДА, ммоль/г сырой массы	Пролин, мг/г сырой массы	Хлорофилл <i>a</i> и <i>b</i> , мг/г сырой массы
Контроль	33,33±0,17	34,90±0,06	0,187±0,002
KS-55 AU	20,83±0,01*	55,43±0,02*	0,444±0,003*
KS-56 AU	26,67±0,03*	35,46±0,04	0,189±0,005
KS-57 AU	24,23±0,05*	34,90±0,03	0,188±0,005
KS-58 AU	33,32±0,18	39,73±0,02*	0,285±0,007*
KS-59 AU	17,81±0,02*	60,51±0,01*	0,410±0,004*
KS-60 AU	30,54±0,02*	35,01±0,05	0,189±0,001
KS-61 AU	24,00±0,03*	49,49±0,03*	0,451±0,001*
PS17	22,65±0,01*	53,74±0,02	0,301±0,002

На стабильность метаболизма растений и целостность мембран может также оказывать влияние свободный пролин, накопление которого увеличивается при стрессах [24]. В наших экспериментах в проростках пшеницы и сои, обработанных перед посадкой штаммами *B. subtilis* KS-55 AU, *B. cereus* KS-59 AU и *B. pumilus* KS-61 AU, этот низкомолекулярный антиоксидант аккумулировался сильнее всего (табл. 4, табл. 5). Содержание пролина в тканях пшеницы при обработке штаммом *B. subtilis* KS-55 AU возрастало, относительно контроля, на 148% в проростках сое в варианте с *B. cereus* KS-59 AU – на 73%. Ранее в работе Nan Q-Q. Было показано, что при использовании RGPB в растениях кукурузы происходило накопление пролина, благодаря которому повышалось относительное содержание воды в клетках [25].

В листьях, обработанных эндофитами растений, увеличивалось содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилла *a* и *b*), что

свидетельствует об уменьшении отрицательного влияния дефицита влаги на их синтетический аппарат (табл. 4, табл. 5). Необходимо отметить, что максимальное повышение концентрации пигментов (на 6%) в листьях пшеницы отмечено при обработке штаммом *B. subtilis* KS-55 AU. В листьях сои содержание суммарного хлорофилла *a* и *b* сильнее всего (на 141%) возрастало при обработке *B. pumilus* KS-61. Аналогичное увеличение количества фотосинтетических пигментов при обработке биологическими препаратами наблюдали Мартынов А. А. и соавт. [26]. В работе Аллагуловой Ч. Р. [27] были зафиксированы увеличение концентрации фотосинтетических пигментов и снижение содержания МДА при солевом стрессе у растений, обработанных бактериями *B. subtilis* GB03.

Выводы. Предпосевная обработка семян однодольных (яровая пшеница сорта Йолдыз) и двудольных (соя сорта Султана) растений эндофитными бактериями рода *Bacillus*

стимулирует рост и стрессоустойчивость культур. Корреляции между используемым титром клеток бактерий и изменением длины корней не обнаружено, но наиболее близкой к оптимальной рост-стимулирующей концентрацией бактерий для обработки семян была 1×10^6 клеток в 1 мл препарата (длина корня сои увеличивалась на 0,6 см, пшеницы – 0,4 см).

В условиях вегетационных опытов отмечено положительное влияние бактерий, в особенности штаммов *Bacillus subtilis* KS-55 AU, *Bacillus cereus* KS-59 AU и *Bacillus pumilus* KS-61 AU, на устойчивость однодольных и двудольных культур к условиям почвенной засухи и выявлены биохимические маркеры позитивного действия. Происходило достоверное снижение уровня перекисного окисления липидов, интегрального показателя

устойчивости мембран при стрессах, у пшеницы на 46%, у сои – на 47%. В обработанных вариантах отмечали накопление одного из важнейших осмопротекторов – свободного пролина: у пшеницы – на 148%, у сои – на 73%. Концентрация фотосинтетических пигментов (хлорофилла а и б) у пшеницы возрас- тала на 6%, у сои – на 141%, что указывает на сохранение стабильности фотосинтетического аппарата в листьях при засухе.

После предпосевной обработки семян яровой пшеницы сорта Йолдыз эндофитными микроорганизмами число взошедших семян увеличилось на 30%, сои сорта Султана – на 40%.

Сведения об источнике финансирования. Работа выполнена по государственному заданию НИОКТР №123031400113-5 при финансовой поддержке Минсельхоз России.

Литература

1. Abiotic stress responses and microbe-mediated mitigation in plants: the omics strategies / K. K. Meena, A. M. Sory, U. M. Bitla, et al. // *Frontiers in plant science*. 2017. Vol. 8. P. 191–215.
2. Оценка эффективности предпосевной обработки семян и посевов биологически активными веществами на яровой пшенице в условиях Предкамья Республики Татарстан / М. Ф. Амиров, А. Я. Сафиуллин, М. Ю. Гилязов [и др.] // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2023. – Т. 18, № 2 (70). – С. 5-12.
3. Изменение термических ресурсов вегетационного периода и урожайность яровой пшеницы в условиях Среднего Поволжья / А. Р. Сержанова, М. Ю. Гилязов, Ф. Ш. Шайхутдинов [и др.] // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2023. – Т. 18, № 1(69). – С. 38-44.
4. Мадякин, Е. В. Исследования по адаптивности сортов яровой пшеницы в Поволжье / Е. В. Мадякин, О. И. Горянин // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2023. – № 1(61). – С. 40-45.
5. Крупнов В. А. Генетическая сложность и контекст-специфичность признаков урожая пшеницы в засушливых условиях // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2013. Т. 17. №. 3. С. 524–534.
6. Амиров, М. Ф. Влияние минеральных удобрений, обработки семян и посевов на продуктивность яровой пшеницы в условиях Предкамья Республики Татарстан / М. Ф. Амиров, Д. И. Толокнов // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2022. – Т. 17, № 2(66). – С. 8-13.
7. Якомаскин, С. С. Минеральное питание как основа физиологических процессов, происходящих в растениях / С. С. Якомаскин, В. И. Каргин, А. А. Зубарев // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2023. – № 2(62). – С. 36-40.
8. The potential application of endophytes in management of stress from drought and salinity in crop plants / H. Verma, D. Kumar, V. Kumar, et al. // *Microorganisms*. 2021. Vol. 9. No. 8. Article 1729. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2607/9/8/1729> (дата обращения: 01.11.2023). doi: 10.3390/microorganisms9081729.
9. Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting Rhizobacteria / S. S. K. P. Vurukonda, S. Vardharajula, M. Shrivastava, et al. // *Microbiological Research*. 2016. Vol. 184. P. 13–24.
10. Mercado-Blanco J., Lugtenberg B. J. J. Biotechnological applications of bacterial endophytes // *Current Biotechnology*. 2014. Vol. 3. No. 1. P. 60–75.
11. Особенности действия бактерий *Bacillus subtilis* № 2 и гуминового препарата на плодообразование перца сладкого / В.Н. Пищик, Н.И. Воробьев, О.Р. Удалова и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2019. № 3. С. 22-27.
12. Щербakov А. В., Заплаткин А. Н., Чеботарь В. К. Эндофитные бактерии, населяющие семена пшеницы, перспективные продуценты микробных препаратов для сельского хозяйства // *Достижения науки и техники АПК*. 2013. № 7. С. 35–38.
13. Монастырский О. А. Биопрепараты: типы, рынки в России и в других странах // *Агрохимия*. 2019. № 11. С. 86–90.
14. Влияние кратности обработок картофеля эндофитными бактериями *Bacillus subtilis* на содержание пигментов в листьях, продуктивность и устойчивость к болезням / Л.И. Пусенкова, С.Р. Гарипова, К.А. Федорова и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 10. С. 11-17.
15. Эффективность микробиологических препаратов при возделывании ячменя // С.И. Коржов, Т.А. Трофимова, Д. Каргбо и др. // *Земледелие*. 2022. № 7. С. 40-44.
16. Эндофитные микроорганизмы в фундаментальных исследованиях и сельском хозяйстве / Е. Н. Васильева, Г. А. Ахтемова, В. А. Жуков и др. // *Экологическая генетика*. 2019. Т. 17. №. 1. С. 19–32.
17. Абрамова А. А., Шаймуллина Г. Х. Оценка количественных изменений в микробиоме почвы и растении яровой пшеницы на ранних стадиях ее развития при обработке биопрепаратами в полевых опытах 2020 и 2021 годов // *Агрономия*. 2022. №. 3. С. 6–11.
18. Acetylene reduction assay for nitrogenase activity in root nodules under salinity stress / L. Gu, J. R. Loya, S. Subramanian, et al. // *Methods in Enzymology*. 2023. Vol. 683. P. 253–264. doi: 10.1016/bs.mie.2022.08.044.
19. Методы определения редокс-статуса культивируемых клеток растений: учебно-методическое пособие / Г. В. Сибгатуллина, Л. Р. Хаертдинова, Е. А. Гумерова и др. Казань: Казанский (Приволжский) Федеральный университет, 2011. 61 с.

20. Модифицированная методика определения пролина в растительных объектах / Г. Н. Шихалеева, А. К. Будняк, И. И. Шихалеев и др. // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: Біологія. 2014. №. 21. С. 168–172.

21. Effect of various biological control agents (BCAs) on drought resistance and spring barley productivity / R. Safin, L. Karimova, L. Nizhegorodtseva, et al. // BIO Web of Conferences. France: EDP Sciences, 2020. Vol. 17. Article 00063.

22. Effects of *Bacillus subtilis* on some physiological and biochemical parameters of *Triticum aestivum* L. (wheat) under salinity / O. Lastochkina, L. Pusenkova, R. Yuldashev, et al. // Plant physiology and biochemistry. 2017. Vol. 121. P. 80–88.

23. Response of plants to water stress / Y. Osakabe, K. Osakabe, K. Shinozaki, et al. // Front. Plant Sci. 2014. Vol. 5. Article 86. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2014.00086/full> (дата обращения: 04.11.2023).

24. Proline, a multifaceted signalling molecule in plant responses to abiotic stress: understanding the physiological mechanisms / U. K. Ghosh, M. N. Islam, M. N. Siddiqui, et al. // Plant Biology. 2022. Vol. 24. No. 2. P. 227–239.

25. Beneficial soil bacterium *Bacillus subtilis* (GB03) augments salt tolerance of white clover / Q. Q. Han, X. P. Lu, J. P. Bai, et al. // Frontiers in plant science. 2014. Vol. 5. Article 525. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2014.00525/full> (дата обращения: 04.11.2023).

26. Оценка эффекта биологической обработки семян яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в лабораторных условиях / А. А. Мартынов, Н. А. Боме, Д. А. Базюк и др. // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №. 3 (129). С. 67–77.

27. Аллагулова Ч. Р., Ласточкина О. В. Снижение уровня окислительного стресса в растениях пшеницы под влиянием эндофитных бактерий в условиях засухи // Экобиотех. 2020. Т. 3. №. 2. С. 129–134.

Сведения об авторах:

Шаймуллина Гульназ Хидиятовна – аспирант, научный сотрудник Центра агроэкологических исследований, e-mail: gulnazshajmullina@yandex.ru

Сафин Радик Ильясович – член-корреспондент АН РТ, доктор сельскохозяйственных наук, заведующий кафедрой общего земледелия, защиты растений и селекции, e-mail: radiksaf2@mail.ru

Егорова Ольга Алексеевна – аспирант, младший научный сотрудник Центра агроэкологических исследований, e-mail: egorova.615@mail.ru

Валиев Айрат Расимович – доктор технических наук, ректор, чл.-корр. АН РТ, профессор кафедры эксплуатации и ремонта машин, e-mail: ayratvaliev@mail.ru

Калимуллин Марат Назипович – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации и ремонта машин, e-mail: marat-kmn@yandex.ru

Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия.

STUDY OF THE INFLUENCE OF ENDOPHYTIC BACTERIA OF THE GENUS *BACILLUS* ON THE GROWTH AND STRESS RESISTANCE OF SPRING WHEAT AND SOYBEAN SEEDLINGS G. Kh. Shaymullin, R. I. Safin, O. A. Egorova, A. R. Valiev, M. N. Kalimullin

Abstract. The studies were carried out to assess the indicators of seed germination, root length, level of lipid peroxidation, content of photosynthetic pigments and free proline in monocotyledonous and dicotyledonous crops when seeds were treated with strains of endophytic bacteria of the genus *Bacillus*. The scheme of vegetation experiments included modeling of 30% drought on sand and pre-sowing treatment of seeds of spring wheat variety Yoldyz and soybean variety Sultana with endophytic bacteria: *Bacillus subtilis* KS-55 AU, *Bacillus cereus* KS-56 AU, *Bacillus pumilus* KS-57 AU, *Bacillus megaterium* KS-58 AU, *Bacillus cereus* KS-59 AU, *Bacillus megaterium* KS-60 AU and *Bacillus pumilus* KS-61 AU. Bacteria better stimulated root growth when using a titer of 1×10^6 cells in 1 ml of the drug (the increase was 0.6 cm on soybean with *Bacillus subtilis* KS-55 AU and *Bacillus megaterium* KS-60 AU and 0.4 cm on wheat with *Bacillus cereus* KS-56 AU, *Bacillus cereus* KS-59 AU and *Bacillus pumilus* KS-61 AU). In wheat, the *Bacillus subtilis* KS-55 AU strain stood out, treatment with which contributed to an increase in germination by 30%, a decrease in the level of lipid peroxidation by 46%, an increase in the amount of free proline by 148% and photosynthetic pigments by 6%, relative to the control variant. On soybean plants, the strain *Bacillus subtilis* KS-55 AU contributed to an increase in germination by 40%, *Bacillus cereus* KS-59 AU contributed to a decrease in the level of lipid peroxidation by 47% and the accumulation of proline by 73%, and *Bacillus pumilus* KS-61 AU increased the amount of total chlorophyll by 141%, relative to the control variant. Thus, we can conclude that the above strains of endophytic bacteria improve the growth and development of spring wheat and soybean seedlings, and also serve as inducers of crop resistance to soil drought.

Key words: spring wheat, soybean, endophytic bacteria of the genus *Bacillus*, drought, lipid peroxidation, proline, chlorophyll.

References

1. Meena KK, Sorty AM, Bitla UM. Abiotic stress responses and microbe-mediated mitigation in plants: the omics strategies. *Frontiers in plant science*. 2017; Vol.8. 191-215 p.
2. Amirov MF, Safiullin AYa, Gilyazov MYu. [Evaluation of the effectiveness of pre-sowing treatment of seeds and crops with biologically active substances on spring wheat in the conditions of Kama region of the Republic of Tatarstan]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023; Vol.18. 2(70). 5-12 p.
3. Serzhanova AR, Gilyazov MYu, Shaykhtudinov FSh. [Changes in thermal resources of the growing season and spring wheat productivity in the conditions of Middle Volga region]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023; Vol.18. 1(69). 38-44 p.
4. Madyakin EV, Goryanin OI. [Research on the adaptability of spring wheat varieties in Volga region]. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2023; 1(61). 40-45 p.
5. Krupnov VA. [Genetic complexity and context-specificity of wheat yield traits in arid conditions]. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii*. 2013; Vol.17. 3. 524-534 p.
6. Amirov MF, Toloknov DI. [The influence of mineral fertilizers, seed and crop treatment on the productivity of spring wheat in the conditions of Kama region of the Republic of Tatarstan]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022; Vol.17. 2(66). 8-13 p.
7. Yakomaskin SS, Kargin VI, Zubarev AA. [Mineral nutrition as the basis of physiological processes occurring in

- plants]. Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. 2023; 2(62). 36-40 p.
8. Verma H, Kumar D, Kumar V. The potential application of endophytes in management of stress from drought and salinity in crop plants. [Internet]. Microorganisms. 2021; Vol.9. 8. Article 1729. [cited 2023, November 01]. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-2607/9/8/1729>. doi: 10.3390/microorganisms9081729.
9. Vurukonda SSKP, Vardharajula S, Shrivastava M. Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting Rhizobacteria. Microbiological Research. 2016; Vol.184. 13-24 p.
10. Mercado-Blanco J, Lugtenberg BJJ. Biotechnological applications of bacterial endophytes. Current Biotechnology. 2014; Vol.3. 1. 60-75 p.
11. Pishchik VN, Vorob'ev NI, Udalova OR. [Features of the action of bacteria Bacillus subtilis No. 2 and humic preparation on the fruit formation of sweet pepper]. Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka. 2019; 3. 22-27 p.
12. Shcherbakov AV, Zaplatkin AN, Chebotar' VK. [Endophytic bacteria inhabiting wheat seeds are promising producers of microbial preparations for agriculture]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2013; 7. 35-38 p.
13. Monastyrskiy OA. [Biological products: types, markets in Russia and other countries]. Agrokhimiya. 2019; 11. 86-90 p.
14. Pusenkova LI, Garipova SR, Fedorova KA. [The influence of the frequency of potato treatments with endophytic bacteria Bacillus subtilis on the content of pigments in the leaves, productivity and disease resistance]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2022; Vol.36. 10. 11-17 p.
15. Korzhov SI, Trofimova TA, Kargbo D. [Efficiency of microbiological preparations in the cultivation of barley]. Zemledelie. 2022; 7. 40-44 p.
16. Vasil'eva EN, Akhtemova GA, Zhukov VA. [Endophytic microorganisms in fundamental research and agriculture]. Ekologicheskaya genetika. 2019; Vol.17. 1. 19-32 p.
17. Abramova AA, Shaymullina GK. [Assessment of quantitative changes in the microbiome of soil and plants of spring wheat at the early stages of its development when treated with biological products in field experiments in 2020 and 2021]. Agronomiya. 2022; 3. 6-11 p.
18. Gu L, Loya JR, Subramanian S. Acetylene reduction assay for nitrogenase activity in root nodules under salinity stress. Methods in Enzymology. 2023; Vol.683. 253-264 p. doi: 10.1016/bs.mie.2022.08.044.
19. Sibgatullina GV, Khaertdinova LR, Gumerova EA. Metody opredeleniya redoks-statusa kultiviruemykh kletok rastenii: uchebno-metodicheskoe posobie. [Methods for determining the redox status of cultured plant cells: educational manual]. Kazan': Kazanskiy (Privolzhskiy) Federal'nyy universitet. 2011; 61 p.
20. Shikhaleeva GN, Budnyak AK, Shikhaleev II. [Modified method for determining proline in plant objects]. Vestnik Kharkivs'kogo natsional'nogo universitetu imeni V.N. Karazina. Seriya: Biologiya. 2014; 21. 168-172 p.
21. Safin R, Karimova L, Nizhegorodtseva L. Effect of various biological control agents (BCAs) on drought resistance and spring barley productivity. [Internet]. BIO Web of Conferences. France: EDP Sciences. 2020; Vol.17. Article 00063. [cited 2023, November 04]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/339553464>.
22. Lastochkina O, Pusenkova L, Yuldashev R. Effects of Bacillus subtilis on some physiological and biochemical parameters of Triticum aestivum L. (wheat) under salinity. Plant physiology and biochemistry. 2017; Vol.121. 80-88 p.
23. Osakabe Y, Osakabe K, Shinozaki K. Response of plants to water stress. [Internet]. Front. Plant Sci. 2014; Vol.5. Article 86. [cited 2023, November 04]. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2014.00086/full>.
24. Ghosh UK, Islam MN, Siddiqui MN. Proline, a multifaceted signalling molecule in plant responses to abiotic stress: understanding the physiological mechanisms. Plant Biology. 2022; Vol.24. 2. 227-239 p.
25. Han QQ, Lu XP, Bai JP. Beneficial soil bacterium Bacillus subtilis (GB03) augments salt tolerance of white clover. [Internet]. Frontiers in plant science. 2014; Vol.5. Article 525. [cited 2023, November 04]. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2014.00525/full>.
26. Martynov AA, Bome NA, Bazyuk DA. [Evaluation of the effect of biological treatment of seeds of spring soft wheat (Triticum aestivum L.) in laboratory conditions]. Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. 2023; 3 (129). 67-77 p.
27. Allagulova ChR, Lastochkina OV. [Reduction of the level of oxidative stress in wheat plants under the influence of endophytic bacteria under drought conditions]. Ekobiotech. 2020; Vol.3. 2. 129-134 p.

Authors:

Shaymullina Gulnaz Khidiyatovna – postgraduate student, researcher of Agroecological Research Center, e-mail: gulnazshajmullina@yandex.ru

Safin Radik Ilyasovich – Corresponding Member of Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Doctor of Agricultural Sciences, Head of General Agriculture, Plant Protection and Breeding Department, e-mail: radiksaf2@mail.ru

Egorova Olga Alekseevna – postgraduate student, junior researcher of Agroecological Research Center, e-mail: egorova.615@mail.ru

Valiev Ayrat Rasimovich – Doctor of Technical Sciences, Rector, corresponding member of the Academy of Sciences of Tatarstan, Professor of the Department of Operation and Repair of Machines, e-mail: ayratvaliev@mail.ru

Kalimullin Marat Nazipovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Operation and Repair of Machines Department, e-mail: marat-kmn@yandex.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.