

УДК 631.461.5:631.547:633.1“321”

ВЛИЯНИЕ АССОЦИАТИВНОЙ АЗОТФИКСАЦИИ В РИЗОСФЕРЕ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ[§]

© 2025 г. Н. Н. Шулико^{1,*}, О. А. Юсова¹, А. А. Киселёва¹, Е. В. Тукмачева¹, В. С. Юсов¹,
Е. В. Кубасова¹, И. А. Корчагина¹, А. Ю. Тимохин¹

¹Омский аграрный научный центр
644012 Омск, просп. Королева, 26, Россия

*E-mail: shuliko@anc55.ru

Фотосинтетическая деятельность растений оказывает существенное влияние на интенсивность азотфиксации, в результате активации которой повышается продуктивность сельскохозяйственных культур. На данный момент отмечен дефицит научных данных о процессе азотфиксации и количественной оценки его активности в агроэкосистемах. Не установлена истинная роль микроорганизмов-азотфиксаторов в азотном балансе почв. Также недостаточно данных о питании, росте и развитии растений на фоне фиксации атмосферного азота (за счет ассоциативной азотфиксации). Актуальность исследования заключалась в биологической оценке воздействия инокуляции семян фунгицидно-стимулирующими биопрепаратами на степень ассоциативной азотфиксации в ризосфере, приживаемость внесенных штаммов diaзотрофов, рост и развитие растений, формирование урожайности в условиях южной лесостепной зоны Западной Сибири. Работу выполняли в полевых опытах на сортах яровой мягкой пшеницы Омская 42, Омская 44, Тарская 12 и сорте яровой твердой пшеницы Омский коралл. Предпосевную бактериализацию семян осуществляли инокулянтom diaзотрофных бактерий рода *Arthrobacter mysorens* 7 и инокулянтom бактерий фунгицидно-стимулирующего действия рода *Flavobacterium* sp. L-30. Отбор проб ризосферы проводили в следующих фенологических фазах: кущении (июнь), колошении (июль), налива зерна (август). Активность процесса ассоциативной азотфиксации в ризосфере зерновых существенно изменялась в зависимости от применения биопрепаратов и вида культуры. На протяжении вегетационного периода при внесении бактерий *Flavobacterium* sp. и *Arthrobacter mysorens* 7 установлено усиление азотфиксирующей способности в ризосфере и высокая приживаемость интродуцированных бактерий. Наибольшим уровнем азотфиксирующей активности был в ризосфере сорта мягкой пшеницы сорта Омская 42 и твердой пшеницы Омский коралл, составив 151–322 и 140–393 нМ C₂H₂/100 г почвы при интродукции бактерий рода *Arthrobacter mysorens* 7, 149–281 и 86.2–555 нМ C₂H₂/100 г почвы при внесении *Flavobacterium* sp. соответственно. Параллельно наблюдали рост количества КОЕ интродуцированных бактерий, в результате чего активизировался процесс азотфиксации. Отмечен сложный характер взаимодействия исследованных показателей – от средней прямой до средней обратной сопряженности в зависимости от фазы развития. Активность ассоциативной азотфиксации в фазе колошения характеризовалась положительной корреляцией с урожайностью и формированием количества зерен в колосе ($r = 0.55$ и 0.35), в фазах кущения и налива зерна – с массой зерна колоса ($r = 0.36$ и 0.75).

Ключевые слова: ассоциативная азотфиксация, инокуляция, ризосферные бактерии, яровая пшеница, площадь листовой поверхности, накопление сухой биомассы, общий азот растений, урожайность зерна.

DOI: 10.31857/S0002188125030076, EDN: UQJCWR

ВВЕДЕНИЕ

Фотосинтез – это процесс, от которого зависит жизнь растений в частности и экосистем, в целом.

[§] Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10064, <https://rscf.ru/project/23-76-10064/>.

Замедление фотосинтеза определяет плохое состояние здоровья растений по причинам водной, питательной, температурной недостаточности и т.п. [1]. Фотосинтетическая деятельность растений напрямую зависит от биологических особенностей и изменяется в зависимости от этапов органогенеза и условий произрастания [1, 2].

Одним из важнейших элементов, определяющим рост и развитие растений, является азот. Он составляет около 2% от общего количества сухого вещества растений, поступающего в пищевую цепь. Тем не менее, растения не могут напрямую получать доступ к газообразному азоту, который составляет $\approx 80\%$ атмосферы. Растения поглощают доступный азот из почвы через корни в виде аммония и нитратов [3, 4].

Основным путем снабжения небобовых растений биологическим азотом признается ассоциативная азотфиксация. Фактором, определяющим ее эффективность, является применение биологических препаратов, созданных на основе активных штаммов микроорганизмов, обладающих повышенной способностью к ассоциации с культурными растениями и интенсивной азотфиксацией [5–7]. Микробная азотфиксация играет ключевую роль в балансе азота в биосфере и по своей значимости для живой природы сравнима только с другим глобальным процессом — фотосинтезом [8]. Активизация азотфиксации может происходить как при бактериализации семян, так и при синтезе физиологически активных веществ [9].

Фиксация азота и выработка фитогормонов этими микроорганизмами считаются наиболее важными элементами стимулирования роста растений. Интенсивность стимулирования культур, особенно зерновых, включая перенос фиксированного азота от бактерий к растению, зависит от эффективного взаимодействия генотипа растения, вида бактерий и типа почв [10–12].

Известно, что фотосинтетическая деятельность растений существенно влияет на динамику и интенсивность азотфиксации, а также повышает продуктивность сортов в экосистеме. Отмечен положительный эффект комплексной обработки растений препаратами макро- и микроэлементов как одо-го из способов снижения нарушений процесса азотного питания и увеличения адаптационного потенциала растений [13].

Небобовые растения образуют расширенную нишу для различных видов азотфиксирующих бактерий. Эти бактерии развиваются внутри растения, успешно колонизируя корни, стебли и листья. Во время ассоциации бактерии приносят пользу хозяину, заметно увеличивая рост растения и урожайность. В этом отношении богатство азотфиксирующей флоры небобовых растений и степень их взаимодействия с хозяином определенно вселяют надежду на разработку экологически чистой альтернативы азотным удобрениям [14]. Внесение в почву (с семенами) активных штаммов ризосферных микроорганизмов в большинстве случаев обеспечивает существенный рост интенсивности связывания атмосферного азота в злаковых агроценозах [15].

Интродукция ризосферных бактерий *Arthrobacter mysorens* 7 и *Flavobacterium* sp. стимулирует рост

растений вследствие подавления фитопатогенных микроорганизмов, увеличения доступности в почве и поглощения растениями питательных элементов и активизации микробиологической азотфиксации в ризосфере [16, 17].

Вопросы эффективности (целесообразности) внесения этих бактерий с семенами в ризосферу зерновых, их воздействие на процесс ассоциативной азотфиксации, приживаемость, а также урожайность возделываемых растений в условиях Западной Сибири изучены недостаточно.

В связи с этим была определена цель работы — изучение влияния бактериальных препаратов комплексного действия на азотфиксирующую активность ризосферы, рост, развитие и формирование продуктивности сортов яровой пшеницы в условиях юга Западной Сибири.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в полевом опыте в южной лесостепи Омской обл., изучено влияние биопрепаратов Мизорин и Флавобактерин (производство ВНИСХМ, г. Санкт-Петербург—Пушкин) на интенсивность роста и развития растений новых сортов яровой пшеницы омской селекции в зависимости от активности процесса азотфиксации ризосферы.

Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов: агрокультура (фактор А) — сорта яровой мягкой пшеницы Омская 42, Омская 44, Тарская 12, сорт яровой твердой пшеницы Омский коралл; бактериальный препарат для инокуляции семян (фактор Б) — без препарата, Мизорин, Флавобактерин.

Инокуляцию семян проводили в день посева рекомендованной дозой. Площадь одной делянки — 13.5 м^2 ($15 \times 0.9 \text{ м}$). Предшественник — чистый пар. Повторность вариантов четырехкратная. Площадь под опытом — 942 м^2 . Отбор проб почвы ризосферы проводили в фазах развития растений: кущения (июнь), колошения (июль), налива зерна (август). Посев культур выполнен в оптимальные сроки с проведением комплекса весенне-полевых работ, рекомендованной нормой высева, сортами, включенными в Государственный реестр селекционных достижений с допуском в 10-м регионе.

Почва опытного участка — лугово-черноземная среднемошная среднегумусная тяжелосуглинистая с содержанием в пахотном слое (0–20 см) гумуса — 6.5%, общего азота — 0.32%, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ — 6.5 ед. Содержание нитратного азота в почве — до 10 мг/кг в слое 0–20 см (очень низкое), подвижного фосфора и калия (по Чирикову) — соответственно 120 и 297 мг/кг (высокое и очень высокое).

Азотфиксирующую активность ризосферы определяли ацетиленовым методом по восстановлению

ацетилен в этилен посредством газовой хроматографии на газовом хроматографе “Хроматэк – Кристалл 5000” [7].

Общую численность *Flavobacterium* sp. и *Arthrobacter mysorens* 7 учитывали на агаре Федорова–Калининской (основная среда для культивирования ассоциативных азотфиксирующих микроорганизмов (ассоциативных diaзотрофов) почвы) [18].

Для оценки роста и развития растений проведены следующие физиологические исследования: площадь листовой поверхности и общая ассимиляционная поверхность [19], анализ накопления и распределения сухой биомассы [20] и общего азота [21] растений. Измерения проводили на 10 флаговых листьях каждого сорта в фазах кушения, колошения и налива зерна.

Математическую обработку полученных данных проводили методами вариационной статистики [22] (среднее арифметическое, стандартное отклонение) с использованием программного пакета Microsoft Office Excel 2007. Приведен расчет коэффициентов корреляции [23] с помощью пакета R version 4.1.2 [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В полевых опытах при внесении бактерий *Flavobacterium* sp. и *Arthrobacter mysorens* 7 установлено усиление азотфиксирующей активности в ризосфере и активная приживаемость интродуцированных бактерий. Процесс азотфиксации параллельно с приживаемостью бактерий повышался и достигал максимума к фазе налива зерна. Уровень азотфиксирующей активности в процессе роста инокулированных растений яровой мягкой пшеницы сорта Омская 42 был на 123 и 122% больше контроля в период кушения, на 87 и 63% – в период налива зерна (табл. 1).

Стоит отметить рост абсолютных величин активности ассоциативной азотфиксации от фазы кушения до налива зерна, что свидетельствовало о хорошей приживаемости интродуцированных бактерий. Численность бактерий *Arthrobacter mysorens* 7 в ризосфере пшеницы в течение этого периода времени изменялась от 1.98 до 2.15×10^6 КОЕ/г абсолютно сухой почвы (а.с.п.), *Flavobacterium* sp. – от 1.00 до 1.38×10^6 КОЕ/г а.с.п.

В процессе роста растений яровой мягкой пшеницы сортов Тарская 12 и Омская 44 наблюдали усиление активности азотфиксации в ризосфере при внесении diaзотрофных бактерий. Азотфиксирующая активность в ризосфере инокулированных растений сорта Тарская 12 была наибольшей при применении Флавобактерина, увеличиваясь в зависимости от фазы роста на 35–50% относительно контроля. Применение Мизорина приводило к торможению процесса в фазе кушения, можно предположить конкуренцию внесенных микроорганизмов

с аборигенной микрофлорой, в дальнейшем по мере развития культуры азотфиксирующая способность несущественно возросла по отношению к контролю. На активность ассоциативной азотфиксации в ризосфере пшеницы Омская 44 также наибольшее положительное воздействие оказала интродукция в почву бактерий рода *Flavobacterium* sp., усиление процесса составило от 37 до 48% к контролю, влияние *Arthrobacter mysorens* 7 было также стимулирующим, рост составил от 10 до 45%. Численность бактерий рода *Flavobacterium* sp. в ризосфере пшеницы Тарская 12 и Омская 44 находилась на уровне 1.33 – 2.58×10^6 КОЕ/г и 0.90 – 2.60×10^6 КОЕ/г, что было больше, чем количество *Arthrobacter mysorens* 7, это приводило, как упоминали ранее, к преобладающему воздействию на процесс азотфиксации биопрепарата Флавобактерин.

Положительное влияние бактерий *Arthrobacter mysorens* 7 и *Flavobacterium* sp. на активность ассоциативной азотфиксации в ризосфере мягкой пшеницы подтверждено колонизацией ими корневой системы. Обнаружение азотфиксирующей активности в ризосфере зерновых культур при инокуляции фиксирующими атмосферный азот бактериями подтвердило, что происходило образование ассоциаций внесенных бактерий с аборигенными diaзотрофными бактериями, также обладающими способностью к фиксации азота воздуха [25]. Усиление азотфиксирующей активности в ризосфере при внесении бактерий *Arthrobacter mysorens* 7 и *Flavobacterium* sp. могло быть связано с увеличением доступности в почве элементов, участвующих в микробиологической фиксации молекулярного азота [26].

В ризосфере растений яровой твердой пшеницы сорта Омский коралл выявлено неоднозначное влияние приема инокуляции на активность процесса фиксации азота воздуха. Например, в фазе колошения при применении Флавобактерина наблюдали снижение активности азотфиксация на 37% к контролю. Известно, что эффективность примененных препаратов во многом определялась взаимодействием с коренной микрофлорой почвы. При инокуляции в почву попадают микроорганизмы, способные оказывать определенное воздействие (в том числе и негативное) на аборигенную микрофлору и вмешиваться в ход микробных сукцессий с нарушением определенного равновесного сообщества [27]. Применение биопрепаратов увеличивало размеры ассоциативной азотфиксации от 3 до 65% по отношению к контролю. Число клеток *Arthrobacter mysorens* 7 и *Flavobacterium* sp. в ризосфере культуры в течение вегетации варьировало в пределах 0.45 – 2.5×10^6 КОЕ/г и 0.82 – 1.76×10^6 КОЕ/г соответственно.

В среднем от кушения к колошению растений наблюдали закономерное нарастание площади листа

Таблица 1. Активность ассоциативной азотфиксации в ризосфере зерновых при применении бактеризации семян и численность интродуцированных бактерий ($n = 6 \bar{x} \pm S_{\bar{x}}$)

Вариант	Фазы развития			
	кущение	колошение	налив зерна	
Пшеница мягкая сорта Омская 42	Активность азотфиксации, нМ C ₂ H ₄ /100 г почвы			
	Контроль (без инокуляции)	67.3 ± 10.3	134 ± 13	172 ± 4
	Мизорин	151 ± 13	237 ± 16	322 ± 39
	Флавобактерин	149 ± 30	269 ± 49	281 ± 23
	Численность бактерий в ризосфере, КОЕ/г × 10 ⁶			
	<i>Arthrobacter mysorens</i> 7	1.98 ± 0.20	2.33 ± 0.24	2.15 ± 0.10
<i>Flavobacterium</i> sp.	1.00 ± 0.13	1.76 ± 0.13	1.38 ± 0.22	
Пшеница мягкая сорта Тарская 12	Активность азотфиксации, нМ C ₂ H ₄ / 100 г почвы			
	Контроль (без инокуляции)	114 ± 8	160 ± 14	120 ± 8
	Мизорин	79.8 ± 2.0	166 ± 5	143 ± 12
	Флавобактерин	154 ± 12	189 ± 16	181 ± 35
	Численность бактерий в ризосфере, КОЕ/г × 10 ⁶			
	<i>Arthrobacter mysorens</i> 7	1.04 ± 0.13	2.52 ± 0.36	1.78 ± 0.43
<i>Flavobacterium</i> sp.	1.33 ± 0.14	2.58 ± 0.27	1.95 ± 0.36	
Пшеница мягкая сорта Омская 44	Активность азотфиксации, нМ C ₂ H ₄ /100 г почвы			
	Контроль (без инокуляции)	125 ± 16	139 ± 11	192 ± 33
	Мизорин	132 ± 17	188 ± 6	278 ± 37
	Флавобактерин	184 ± 16	190 ± 35	270 ± 13
	Численность бактерий в ризосфере, КОЕ/г × 10 ⁶			
	<i>Arthrobacter mysorens</i> 7	0.86 ± 0.11	1.38 ± 0.21	1.12 ± 0.15
<i>Flavobacterium</i> sp.	0.90 ± 0.09	2.60 ± 0.26	1.75 ± 0.49	
Пшеница твердая сорта Омский коралл	Активность азотфиксации, нМ C ₂ H ₄ /100 г почвы			
	Контроль (без инокуляции)	134 ± 13	136 ± 12	375 ± 25
	Мизорин	218 ± 23	140 ± 15	393 ± 32
	Флавобактерин	181 ± 29	86.2 ± 12.1	555 ± 112
	Численность бактерий в ризосфере, КОЕ/г × 10 ⁶			
	<i>Arthrobacter mysorens</i> 7	0.45 ± 0.05	2.5 ± 0.25	1.48 ± 0.59
<i>Flavobacterium</i> sp.	0.82 ± 0.11	1.76 ± 0.23	1.29 ± 0.27	

Примечания. 1. *Arthrobacter mysorens* 7 – действующее начало биопрепарата Мизорин, *Flavobacterium* sp. – биопрепарата Флавобактерин. 2. n – количество определений, $m \pm SD$ – среднее ± ошибка среднего.

(2.04–25.5 см²), общей ассимиляционной поверхности растений (5.86–146 см²/растение) и накопление сухой биомассы (0.30–18.1 г/растение). В следующей фазе налива зерна происходило снижение всех перечисленных показателей на 15–30%.

Особого внимания заслуживает показатель накопления растением общего азота, который в фазе кушения составил 5.08% и в следующей фазе снижался на 2.19%. Все физиологические процессы, происходящие в растении в период его роста и развития,

направлены на формирование продуктивности, т.к. накопленные растением в течение вегетационного периода пластические вещества поступают в колос. В фазе налива зерна содержание общего азота в вегетативной части растения снижалось на 0.98% по сравнению с предыдущей фазой, основная массовая доля общего азота растения приходилась на зерно колоса (4.03%). В полове колоса содержалось общего азота 2.69%, который при дальнейшем наливе также должен был перейти в зерно (табл. 2).

Отмечена значительная изменчивость исследованных показателей физиологической активности растений во всех фазах развития, а также накопления общего азота в полове и вегетативной части ($20\% < CV < 20\%$), что косвенно могло свидетельствовать о сортовой специфике.

На фоне обработки Флавобактерином сорт Омская 42 характеризовался интенсивным накоплением сухой биомассы в фазах кущения и колошения (+0.05 и 4.70 г/растение к контролю), а также повышенной общей ассимиляционной поверхностью в фазе колошения (на 26% больше контроля). В фазе налива зерна происходило резкое снижение данных показателей (площади флагового листа – на 8%, общей ассимиляционной поверхности – на 40% по отношению к вариантам с предпосевной обработкой семян Мизорином), сухая биомасса растений снижалась до уровня контроля. На этом фоне отмечено накопление значительного запаса общего азота в полове (+0.30% к контролю) и вегетативной части (+0.18% к контролю), которые затем растение потратило на формирование повышенного количества зерен в колосе (+7 шт./колос) и их массы (+0.50 г/растение).

Формирование урожайности на фоне обработки Мизорином показало, что интенсивное развитие растения получили в фазе налива зерна (показатель площади флагового листа увеличился на 37% к контролю и общая ассимиляционная поверхность – на 600%). Однако позднее это послужило причиной низкого накопления общего азота в полове и вегетативной части (на 0.74 и 0.47% меньше контроля) и отрицательно сказалось на формировании количества зерен в колосе и его массе (на 50 и 54% меньше контроля).

Повышенная урожайность отмечена у сорта яровой твердой пшеницы Омский коралл (+0.10 т/га к контролю при предпосевной обработке семян Флавобактерином и +0.05 т/га к контролю – Мизорином). Согласно данным табл. 2, на фоне обработки Флавобактерином отмечено активное развитие растений начиная с фазы колошения (превышение над контролем общей ассимиляционной поверхности, накопления сухой биомассы и общего азота составило от 14 до 26%). В следующей фазе прибавка к контролю показателей ОАП и сухой биомассы отмечена на уровне 35 и 45% соответственно. Также наблюдали повышенное содержание общего азота в зерне и полове (+0.2% к контролю) – именно этот резерв

позволил сформироваться большему числу зерен в колосе (на 25%) с увеличенной массой (на 55%).

На фоне обработки семян сорта яровой твердой пшеницы Омский коралл Мизорином отмечено активное развитие растений в фазе колошения (на 200% к контролю – площади флагового листа, на 52% – ОАП) и резкое усыхание растений в фазе налива (на 23 и 93% к контролю соответственно). Несмотря на повышенную массовую долю общего азота в полове и вегетативной массе растений (+0.8 и 0.21%), его снижение в зерне (–0.15% к контролю) привело к формированию количества зерен на уровне контроля с низкой массой (–0.21 г).

Положительный эффект от инокуляции семян пшеницы Мизорином был получен для урожайности пшеницы сорта Омская 42 (+0.41 т/га к контролю), предпосевная обработка семян Флавобактерином увеличивала урожайность зерна пшеницы сорта Омская 42 на 0.64 т/га. Отрицательная реакция урожайности на инокуляцию вышеупомянутым биопрепаратом отмечена для сортов Тарская 12 и Омская 44 (снижение в пределах ошибки опыта) (табл. 3).

Применение биопрепаратов ассоциативных азотфиксаторов для инокуляции семян пшеницы выявило сортовую специфику их влияния на урожайность зерна: положительное – для одних, отрицательное – для других.

Таким образом, подтвердилось мнение, что для установления эффективных ассоциативных взаимоотношений между растениями и микроорганизмами необходим тщательный отбор соответствующего штамма не только микроорганизма, но и сорта культуры [28].

Возможно, что для установления максимального эффекта применения ассоциативных штаммов бактерий требовалось небольшое количество минерального азота удобрений для стимуляции ростовых процессов растений.

Также необходимо обратить внимание на стимулирование биопрепаратами роста и развития растений в течение периода вегетации, что является фактором формирования повышенной урожайности.

Согласно данным корреляционного анализа, для формирования повышенной урожайности имели значение активный рост и развитие растений в начальный период вегетации (фазы кущения и колошения), в последующем наблюдали конкуренцию за азот между генеративными и вегетативными органами растений (рис. 1).

Связь между величинами урожайности и сухой биомассы растений изменялась от средней прямой в фазе кущения ($r = 0.61$) до слабой в фазе колошения ($r = 0.25$) и обратной в фазе налива зерна ($r = -0.41$). С накоплением общего азота растений

Таблица 2. Физиологическое развитие растений яровой пшеницы в зависимости от активности ассоциативной азотфиксации в ризосфере зерновых при применении бактеризации семян ($n = 6 \times \bar{x}$)

Вариант	Фенологическая фаза													
	кушение			колошение			налив зерна				N, %			
	$S, \text{ см}^2$	ОАП, см^2	сухая биомасса, г/растение	N, %	$S, \text{ см}^2$	ОАП, см^2	сухая биомасса, г/растение	N, %	$S, \text{ см}^2$	ОАП, см^2	сухая биомасса, г/растение	зерно	полова	вегетативная масса
Яровая мягкая пшеница сорта Омская 42	2.8 ± 0.5	7.2 ± 1.2	0.32 ± 0.03	5.02	16.0 ± 1.2	183 ± 10	16.40 ± 1.6	3.04	11.2 ± 0.5	13.5 ± 0.8	10.10 ± 0.7	4.24	2.86	2.12
Мизорин	1.7 ± 0.2	5.2 ± 0.9	0.25 ± 0.02	5.13	16.1 ± 1.3	217 ± 11	18.3 ± 0.8	2.88	15.4 ± 0.4	86.4 ± 1.4	9.40 ± 0.5	3.86	1.50	1.97
Флавобактерин	2.0 ± 0.2	5.2 ± 0.8	0.37 ± 0.04	4.97	15.9 ± 1.1	231 ± 12	21.1 ± 1.2	3.16	14.3 ± 0.3	51.5 ± 0.6	10.1 ± 0.6	3.57	3.16	2.30
Яровая мягкая пшеница сорта Тарская 12	1.7 ± 0.5	5.2 ± 0.8	0.40 ± 0.04	5.01	20.4 ± 1.5	132 ± 8	19.0 ± 0.8	2.81	4.1 ± 0.04	10.3 ± 1.1	3.11 ± 0.02	4.13	2.37	1.35
Мизорин	2.0 ± 0.6	6.2 ± 0.9	0.30 ± 0.03	5.28	26.0 ± 2.1	195 ± 10	27.4 ± 1.2	3.01	6.1 ± 0.02	7.7 ± 0.8	3.62 ± 0.02	4.33	2.53	1.32
Флавобактерин	2.3 ± 0.8	7.4 ± 1.1	0.40 ± 0.04	5.09	22.7 ± 1.6	111 ± 1	14.4 ± 0.5	2.74	5.4 ± 0.02	9.1 ± 0.8	6.42 ± 0.03	4.01	1.96	1.28
Яровая мягкая пшеница сорта Омская 44	1.4 ± 0.6	4.1 ± 0.2	0.21 ± 0.02	5.25	25.5 ± 1.5	117 ± 8	18.0 ± 0.8	2.85	9.5 ± 0.07	30.3 ± 1.1	3.05 ± 0.01	4.23	3.58	2.41
Мизорин	1.8 ± 0.7	5.6 ± 0.2	0.35 ± 0.03	5.19	20.2 ± 1.2	117 ± 8	18.5 ± 0.7	2.86	9.0 ± 0.08	10.9 ± 0.4	3.73 ± 0.01	3.53	2.49	1.63
Флавобактерин	2.4 ± 0.5	6.4 ± 0.3	0.24 ± 0.02	5.20	19.0 ± 0.9	64.4 ± 4.5	11.1 ± 1.1	2.87	9.9 ± 0.06	41.6 ± 0.3	3.89 ± 0.01	3.95	2.20	1.89
Яровая твердая пшеница сорта Омский коралл	2.2 ± 0.5	5.7 ± 0.1	0.28 ± 0.01	4.90	20.7 ± 1.5	1210 ± 11	13.9 ± 1.4	2.53	7.7 ± 0.03	3.1 ± 0.02	5.05 ± 0.02	3.80	3.00	2.10
Мизорин	2.1 ± 0.4	6.0 ± 0.2	0.20 ± 0.01	4.96	81.6 ± 0.8	120 ± 10	21.2 ± 1.9	3.05	1.0 ± 0.01	1.5 ± 0.02	5.43 ± 0.02	4.70	3.60	2.20
Флавобактерин	2.1 ± 0.3	6.1 ± 0.2	0.22 ± 0.01	4.91	22.4 ± 1.4	140 ± 11	17.5 ± 1.2	2.90	7.0 ± 0.2	4.2 ± 0.03	7.34 ± 0.03	4.00	3.00	2.30
Среднее	2.0	5.9	0.30	5.08	25.5	146	18.1	2.89	8.4	22.5	5.94	4.03	2.69	1.91
max	2.8	7.4	0.40	5.28	81.6	231	27.4	3.16	15.4	86.4	10.1	4.70	3.60	2.41
min	1.4	4.10	0.20	4.90	15.9	64	11.1	2.53	1.0	1.5	3.05	3.53	1.50	1.28
CV, %	21.1	20.6	24.7	2.6	30.4	34.1	23.0	5.68	49.0	34.2	35.6	8.14	23.6	21.6
НСР ₀₅	0.1	0.3	0.02	0.04	5.2	14	1.2	0.05	1.2	7.4	0.78	0.09	0.18	0.12

Примечание. S – площадь флагового листа, ОАП – общая ассимиляционная поверхность растения, N – массовая доля общего азота растений, %, $\bar{x} \pm SD$ – среднее ± ошибка среднего, CV – коэффициент вариации.

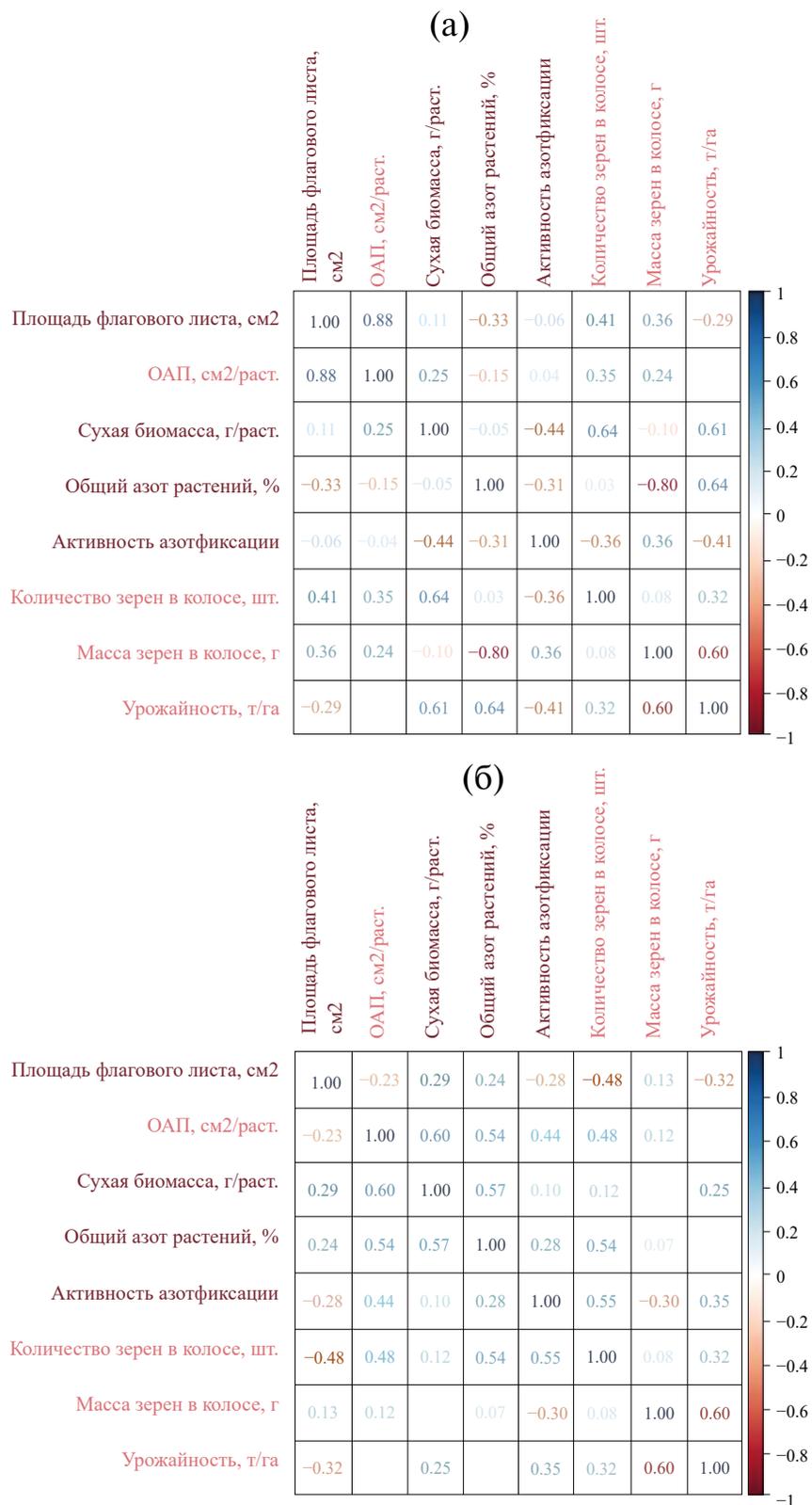


Рис. 1. Взаимосвязи величины урожайности и показателей элементов структуры урожая с физиологическим развитием растений яровой пшеницы в зависимости от активности ассоциативной азотфиксации: (а) – фаза кущения, (б) – фаза колошения, (в) – фаза налива зерна.

(В)

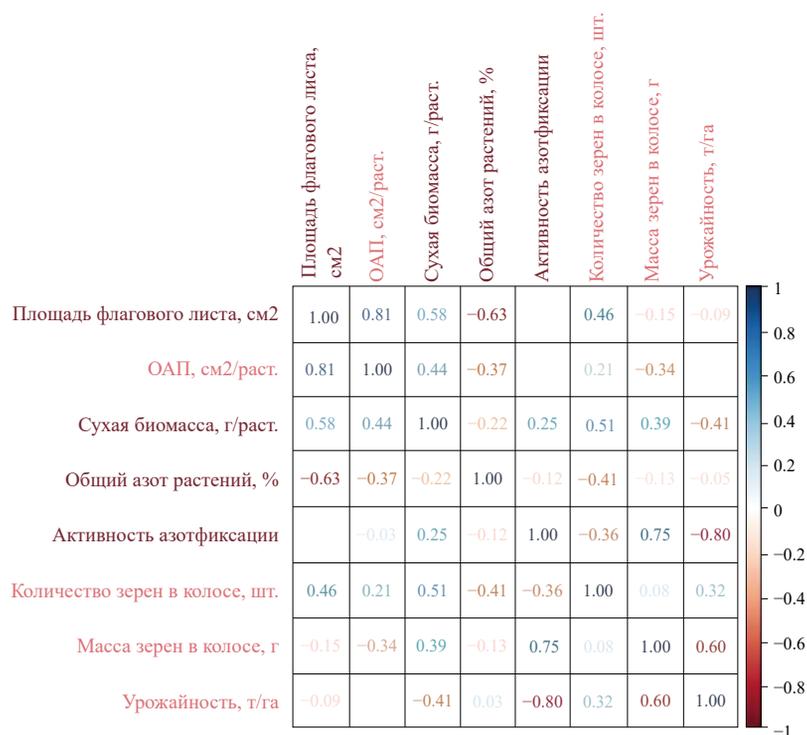


Рис. 1. Окончание.

Таблица 3. Урожайность и элементы структуры урожая, в зависимости от применения биопрепаратов ($n = 8\bar{x}S_{\bar{x}}$)

Вариант		Количество зерен в колосе, шт.	Масса зерна колоса, г	Урожайность	
				т/га	
Яровая мягкая пшеница, сорт Омская 42	Контроль	28 ± 1.2	0.74 ± 0.05	1.70 ± 0.26	
	Мизорин	14 ± 1.3	0.40 ± 0.02	2.11 ± 0.51	
	Флавобактерин	35 ± 2.2	1.24 ± 0.06	2.34 ± 0.71	
Яровая мягкая пшеница, сорт Тарская 12	Контроль	17 ± 1.1	0.53 ± 0.03	3.69 ± 0.14	
	Мизорин	21 ± 1.0	0.60 ± 0.03	3.74 ± 0.21	
	Флавобактерин	21 ± 1.1	0.70 ± 0.04	3.65 ± 0.20	
Яровая мягкая пшеница, сорт Омская 44	Контроль	7 ± 0.9	0.15 ± 0.01	2.67 ± 0.39	
	Мизорин	20 ± 0.8	0.57 ± 0.02	2.69 ± 0.42	
	Флавобактерин	20 ± 1.1	0.53 ± 0.02	2.56 ± 0.44	
Яровая твердая пшеница, сорта Омский коралл	Контроль	8 ± 0.6	1.23 ± 0.08	1.09 ± 0.43	
	Мизорин	7 ± 0.7	1.02 ± 0.07	1.14 ± 0.37	
	Флавобактерин	14 ± 0.9	1.79 ± 0.09	1.19 ± 0.43	

HCP_{05} фактора А = 0.44, HCP_{05} фактора В = 0.31, HCP_{05} АВ = 0.77 т/га

Примечание. HCP_{05} фактора А – сорт, HCP_{05} фактора В – биопрепарат, HCP_{05} факторов АВ – взаимодействие факторов сорт × биопрепарат, n – количество определений, $m \pm SD$ – среднее ± ошибка среднего.

отмечена средняя прямая связь только в фазе кушения ($r = 0.64$), с величиной площади листа – слабая и средняя обратная связь в фазах кушения ($r = -0.29$) и колошения ($r = -0.32$).

Масса зерна колоса имела среднюю корреляцию с величиной площади листа в фазе кушения ($r = 0.36$), которая в дальнейшем менялась на слабую. В фазе налива зерна отмечена отрицательная связь с общей ассимиляционной поверхностью ($r = -0.34$) и положительная – с сухой биомассой растения ($r = 0.39$).

Для формирования повышенного количества зерен в колосе благоприятное влияние оказали показатели площади листа в фазах кушения ($r = 0.41$) и налива зерна ($r = 0.46$) и сухой биомассы растения ($r = 0.64$ и 0.51). Средняя прямая связь с ОАП отмечена в фазах кушения и колошения ($r = 0.35$ и 0.48). Накопление общего азота растений было связано с величиной урожайности прямо пропорционально в фазе колошения ($r = 0.54$) и обратно пропорционально – в фазе налива зерна ($r = -0.41$).

Активность ассоциативной азотфиксации в фазе кушения была обратно пропорциональна сухой биомассе и накоплению общего азота в растении ($r = -0.44$ и $r = -0.31$ соответственно), прямо пропорциональна показателю ОАП в фазе колошения ($r = 0.44$). Отмечена обратная связь величины урожайности и количества зерен в колосе с активностью ассоциативной азотфиксации в фазах кушения ($r = -0.36$ и -0.41) и налива зерна ($r = -0.36$ и -0.80), прямая связь – с активностью ассоциативной азотфиксации в фазе колошения ($r = 0.55$ и 0.35).

Величина массы зерна колоса имела прямую положительную взаимосвязь с активностью ассоциативной азотфиксации в фазах кушения и налива зерна ($r = 0.36$ и 0.75) и обратную – в фазе колошения ($r = -0.30$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, внесенные бактерии колонизировали корневую систему растений пшеницы и усиливали азотфиксирующую активность в ризосфере. Стабильно высокими размеры ассоциативной азотфиксации были в ризосфере пшеницы сортов Омская 42 и Омский коралл, составляя $151-322$ и $140-393$ нМ $C_2H_2/100$ г почвы при интродукции бактерий рода *Arthrobacter mysorens* 7, $149-281$ и $86.2-555$ нМ $C_2H_2/100$ г почвы – при внесении *Flavobacterium* sp. соответственно. Определено, что при увеличении КОЕ клеток интродуцированных бактерий активизировался процесс азотфиксации в ризосфере зерновых.

Выявлен сложный характер взаимодействия показателей роста и развития растений с активностью ассоциативной азотфиксации и их влиянием

на формирование величины урожайности. Связь пар менялась от средней прямой до средней обратной в зависимости от фазы развития растений пшеницы. В основном на формирование повышенной урожайности влиял активный рост и развитие растений в начальный период вегетации (в фазах кушения и колошения), в последующем развитие генеративных органов имело обратную связь с развитием вегетативных.

Активность ассоциативной азотфиксации в фазе колошения характеризовалась положительной корреляцией с показателями урожайности и формирования количества зерен в колосе ($r = 0.55$ и 0.35), в фазах кушения и налива зерна – с массой зерна колоса ($r = 0.36$ и 0.75).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурунов А.Н., Стрижаков А.О., Васин В.Г., Багаудинов Р.Н. Показатели фотосинтетической деятельности растений ячменя при применении препаратов Мегамикс, в лесостепи Среднего Поволжья // Актуальные вопросы кормопроизводства. Состояние, проблемы, пути решения. 2019. С. 157–162.
2. Васин В.Г., Васин А.В., Васина Н.В., Стрижаков А.О. Формирование посевов и продуктивность яровой пшеницы при применении минеральных удобрений // Изв. СамарНЦ РАН. Сел.-хоз. науки. 2022. Т. 1. № 4(4). С. 3–10.
3. Dobermann A. Nutrient use efficiency – measurement and management in a time of new challenges // Proceedings of the IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices. Brussels, Belgium International Fertilizer Industry Association, 2007. P. 1–28.
4. Emerich D.W., Krishnan H.B., Westhoff P. The economics of biological nitrogen fixation in the global economy // Nitrogen fixation in crop production. Madison: WI American Society of Agronomy, 2009. P. 309–328.
5. Тихонович И.А., Завалин А.А. Перспективы использования азотфиксирующих и фитостимулирующих микроорганизмов для повышения эффективности агропромышленного комплекса и улучшения агроэкологической ситуации РФ // Плодородие. 2016. № 5. С. 28–32.
6. Тихонович И.А., Проворов Н.А. Сельскохозяйственная микробиология как основа экологически устойчивого агропроизводства: фундаментальные и прикладные аспекты // Сел.-хоз. биол. 2011. № 3. С. 3–9.
7. Умаров М.М. Ацетиленовый метод изучения азотфиксации в почвенно-микробиологических исследованиях // Почвоведение. 1976. № 1. С. 119–123.

8. Умаров М.М. Азотфиксация в ассоциациях организмов // Пробл. агрохим. и экол. 2009. № 2. С. 22–26.
9. Злотников А.К. Ризосферная азотфиксирующая ассоциация *Bacillus firmus*–*Klebsiella terrigena* и ее влияние на яровой ячмень при инокуляции: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1998. 26 с.
10. Алметов Н.С., Бердников В.В., Волков Е.Г., Семенов П.Н. Эффективность использования ассоциативных азотфиксирующих биопрепаратов на посевах зерновых культур // Бюл. ВИУА. 2001. № 114. С. 56.
11. Алферов А.А., Завалин А.А., Чернова Л.С. Урожайность и качество зерна яровой пшеницы при инокуляции семян ризоагрином // Вестн. сел.-хоз. науки. 2018. № 2. С. 12–16.
12. Souza E.M., Chubatsu L.S., Huergo L.F., Monteiro R., Camilios-Neto D., Wassem R., Pedrosa F.O. Use of nitrogen-fixing bacteria to improve agricultural productivity // BMC Proceed. 2014. № 8. Suppl. 4. O23.
13. Мудрик В.А., Луцицкая О.А. Влияние препаратов микроудобрений, активизирующих ассоциативную азотфиксацию, на засухо- и холодоустойчивость растений яровой пшеницы // Агрохимия. 2014. № 4. С. 70–73.
14. Bhattacharjee R.B., Singh A., Mukhopadhyay S.N. Use of nitrogen-fixing bacteria as biofertiliser for non-legumes: prospects and challenges // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2008. № 80(2). P. 199–209.
15. Шотт П.Р. Фиксация атмосферного азота в однолетних агроценозах. Барнаул: Азбука, 2007. 176 с.
16. Шабает В.П. Микробиологическая азотфиксация и рост растений при внесении ризосферных микроорганизмов и минеральных удобрений // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв. М.: Наука, 2006. С. 195–211.
17. Glick B.R., Todorovic B., Czarny J., Cheng Z., Duan J., McConkey B. Promotion of plant growth by bacterial ACC deaminase // Critic. Rev. Plant Sci. 2007. V. 26. № 1. P. 227–242.
18. Теннер Е.З., Шильникова В.К. Практикум по микробиологии учеб. пособ. для вузов / Под ред. В.К. Шильниковой. М.: Дрофа, 2004. 256 с.
19. Аникеев В.В., Кутузов Ф.Ф. Новый способ определения листовой поверхности у злаков // Физиология растений. 1961. Т. 8. Вып. 3.1. С. 375–377.
20. Методические указания по определению некоторых физиологических показателей растений пшеницы при сортоизучении. ВАСХНИЛ, Совет по научн.-метод. рук-ву селекц. центрами при Президиуме ВАСХНИЛ, НИИ сел. хоз-ва Юго-Востока / Под ред. В.А. Кумакова. М.: ВАСХНИЛ, 1982. 28 с.
21. Плешков Б.П. Практикум по биохимии растений. М.: Колос, 1976. С. 144–148.
22. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
23. Яковлева Л.Н., Роева Л.В. Элементы корреляционно-регрессионного анализа в агрономии // Комплексные вопросы аграрной науки и образования. 2021. С. 214–222.
24. Зарядов И.С. Введение в статистический пакет R: типы переменных, структуры данных, чтение и запись информации, графика. М., 2010. 207 с.
25. Умаров М.М. Ассоциативная азотфиксация. М.: Изд-во МГУ, 1986. 136 с.
26. Минеев В.Г., Сафрина О.С., Шабает В.П. Влияние бактерий рода *Pseudomonas* на некоторые физиолого-биохимические процессы в растениях столовой свеклы // Докл. ВАСХНИЛ. 1992. № 1. С. 16–21.
27. Кожевин П.А. Показатели почвенного “здоровья” в оценке почв (обзор) // Вестн. МГУ. Сер. 17: Почвоведение. 2023. № 2. С. 16–25. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-16-25
28. Воробейков Г.А., Павлова Т.К., Кондрат С.В., Лебедев В.Н., Юргина В.С., Муратова Р.Р., Макаров П.Н., Дубенская Г.И., Хмелевская И.А. Исследование эффективности штаммов ассоциативных ризобактерий в посевах различных видов растений // Изв. РГПУ им. А.И. Герцена. 2011. № 141. С. 114–121.

Effect of Associative Nitrogen Fixation in the Rhizosphere on the Growth and Development of Spring Wheat

N. N. Shuliko^{a,#}, O. A. Yusova^a, A. A. Kiseleva^a, E. V. Tukmacheva^a, V. S. Yusov^a,
E. V. Kubasova^a, I. A. Korchagina^a, A. Yu. Timokhin^a

^aOmsk Agrarian Research Center,
prosp. Koroleva 26, Omsk 644012, Russia

[#]E-mail: shuliko@anc55.ru

The photosynthetic activity of plants has a significant effect on the intensity of nitrogen fixation, as a result of which the productivity of crops increases. At the moment, there is a shortage of scientific data on the nitrogen fixation process and the quantitative assessment of its activity in agroecosystems. The true role of nitrogen fixing microorganisms in the nitrogen balance of soils has not been established. There is also insufficient data on nutrition, growth and development of plants against the background of atmospheric nitrogen fixation (due to associative nitrogen fixation). The relevance of the study lies in the biological assessment of the effect of seed inoculation with fungicide-stimulating biologics on the degree of associative nitrogen fixation in the rhizosphere, the survival rate of introduced diazotrophic strains, plant growth and development, and yield formation in the southern forest-steppe zone of Western Siberia. The work was carried out in field experiments on the varieties of spring soft wheat Omsk 42, Omsk 44, Tarskaya 12 and the variety of spring durum wheat Omsk coral. Pre-sowing bacterization of seeds was carried out with an inoculant of diazotrophic bacteria of the genus *Arthrobacter mysorens* 7 and an inoculant of fungicidal-stimulating bacteria of the genus *Flavobacterium* sp. L-30. Rhizosphere sampling was carried out in the following phenological phases: tillering (June), earing (July), grain filling (August). The activity of the associative nitrogen fixation process in the rhizosphere of cereals varied significantly depending on the use of biological products and the type of culture. During the growing season, when introducing *Flavobacterium* sp. bacteria and *Arthrobacter mysorens* 7, an increase in nitrogen-fixing ability in the rhizosphere and a high survival rate of introduced bacteria were found. The highest level of nitrogen-fixing activity was in the rhizosphere of soft wheat varieties Omsk 42 and durum wheat Omsk coral, amounting to 151–322 and 140–393 nM C₂H₂/100 g of soil during the introduction of bacteria of the genus *Arthrobacter mysorens* 7, 149–281 and 86.2–555 nM C₂H₂/100 g of soil when *Flavobacterium* sp. was introduced, accordingly. In parallel, an increase in the number of CFU introduced bacteria was observed, as a result of which the nitrogen fixation process was activated. The complex nature of the interaction of the studied indicators is noted – from the average direct to the average inverse conjugacy, depending on the phase of development. The activity of associative nitrogen fixation in the earing phase was characterized by a positive correlation with yield and the formation of the number of grains in the ear ($r = 0.55$ and 0.35), in the phases of tillering and filling of grain – with the weight of the ear grain ($r = 0.36$ and 0.75).

Keywords: associative nitrogen fixation, inoculation, rhizospheric bacteria, spring wheat, leaf area surface, accumulation of dry biomass, total nitrogen of plants, grain yield.