

ЭКЗОГЕННАЯ РЕГУЛЯЦИЯ СИМБИОТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НОВЫХ СОРТОВ СОИ В УСЛОВИЯХ ЦЧР

Е.В. ГОЛОВИНА, доктор сельскохозяйственных наук
ORCID ID: 0000-0002-7012-8267, E-mail: kat782010@mail.ru
О.В. ЛЕУХИНА, научный сотрудник, аспирант
E-mail: oxana_leukhina@mail.ru

ФГБНУ ФНЦ ЗЕРНОБОБОВЫХ И КРУПЯНЫХ КУЛЬТУР

Использование взаимосвязи микроорганизмов с растениями в сельском хозяйстве создает предпосылки для перехода к экологически устойчивому земледелию, в котором производство продукции осуществляется при минимальной нагрузке на окружающую среду и экономически более выгодно, чем при интенсивном земледелии. Некорневое питание растений в настоящее время является стандартным технологическим приемом, который позволяет растениям быстро и эффективно регулировать обмен веществ, противостоять стрессам различной напряженности, а также исключает поглощение элементов почвой и снижает общую потребность в них. Цель работы состояла в изучении ризобиального симбиоза сои и влияния некорневых подкормок на его продуктивность в различных погодных условиях. В 2021-2023 гг. в полевом опыте исследовались детерминантный сорт Орлея (селекции ФНЦ ЗБК, внесен в Государственный реестр селекционных достижений РФ в 2024 г.) и индетерминантный сорт Лидер 10 (селекции ООО «АСТ», включен в Государственный реестр селекционных достижений РФ в 2020 г.). В опыт входили следующие варианты: 1. контроль (к), 2. инокуляция (ин), 3. обработка гумифулином (г), 4. инокуляция и обработка гумифулином (ин + г). Установлено: для развития симбиотической системы сои наиболее благоприятными являются годы с высокой влагообеспеченностью (ГТК=2,3). Однако значительная масса клубеньков в этом случае является конкурентом плодовых органов при распределении питательных веществ, что приводит к снижению зерновой продуктивности. Инокуляция и некорневые подкормки гумифулином в среднем по 3-х летним данным увеличивают в течение вегетации количество клубеньков у сортов сои на 24,0%, массу клубеньков – на 37,0%, в результате чего продуктивность возрастает на 35,0%. В слабо засушливых условиях для развития симбиотической системы сорта Лидер 10 инокуляция и некорневые подкормки гумифулином наиболее эффективны в начальный период развития (бутонизация – начало цветения). Во время интенсивного плодообразования и налива бобов в результате оттока пластических веществ к генеративным органам при недостаточной влагообеспеченности положительное влияние технологических приемов снижается или отсутствует. В условиях высокой влагообеспеченности у этого сорта инокуляция и обработка гумифулином способствуют усиленному клубенькообразованию до фазы налив бобов включительно. У скороспелого сорта Орлея различия в воздействии исследованных обработок на азотфиксирующую систему в зависимости от различной влагообеспеченности слабо выражены. В 2021-2023 гг. установлена корреляция на среднем и высоком уровне между продуктивностью и массой клубеньков $r=0,634-0,763$; в 2022 г. – между количеством клубеньков и их массой и нитрогеназной активностью на высоком уровне $r=0,709-0,845$. В засушливом 2023 г. отмечена отрицательная зависимость между продуктивностью и нитрогеназной активностью $r=-0,532$.

Таким образом, инокуляция семян симбиотическими микроорганизмами и применение некорневых подкормок гуминовыми удобрениями при возделывании сои представляют собой экологически безопасные технологические приемы, позволяющие растениям развиваться при минимальном агрохимическом воздействии.

Ключевые слова: соя, симбиотическая деятельность, некорневые подкормки, продуктивность.

Для цитирования: Головина Е.В., Леухина О.В. Экзогенная регуляция симбиотической деятельности новых сортов сои в условиях ЦЧР. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2024; 2(50):30-39. DOI: 10.24412/2309-348X-2024-2-30-39

EXOGENOUS REGULATION OF SYMBIOTIC ACTIVITY OF NEW SOYBEAN VARIETIES IN THE CONDITIONS OF THE CENTRAL CHERNOZEM REGION

E.V. Golovina, O.V. Leukhina

FSBSI FEDERAL SCIENTIFIC CENTER OF LEGUMES AND GROAT CROPS

Abstract: *The use of microbial-plant interactions in agriculture creates prerequisites for transition to ecologically sustainable farming, in which production is carried out with a minimum load on the environment and is economically more profitable than intensive farming. Foliar plant nutrition is currently a standard technological technique that allows plants to quickly and effectively regulate metabolism, withstand stress of various intensity, and also eliminates the absorption of elements by the soil and reduces the overall need for them. The aim of the work was to study rhizobial symbiosis of soybean and the effect of foliar nutrition on its productivity under different weather conditions. In 2021-2023, the varieties Orleya (breeding of FSC LGC, included in the State Register of Breeding Achievements of the Russian Federation in 2024) and Leader 10 (breeding of LLC “AST”, included in the State Register of Breeding Achievements of the Russian Federation in 2020) were studied in the field experiment. The experiments included the following variants: 1. control (c), 2. inoculation (in), 3. humifulin treatment (h), 4. inoculation and humifulin treatment (in + h). It has been established that the most favorable years for the development of the symbiotic system of soybean are years with high moisture availability ($HTC = 2.3$). However, a significant mass of nodules in this case competes with the fruiting organs in the distribution of nutrients, which leads to a decrease in grain productivity. Inoculation and foliar feeding with humifulin, on average, according to 3-year data, increase the number of nodules in soybean varieties during the growing season by 24.0%, the mass of nodules by 37.0%, as a result of which productivity increases by 35.0%. In slightly arid conditions for the development of the symbiotic system of the Leader 10 variety, inoculation and foliar feeding with humifulin are most effective in the initial period of development (budding - beginning of flowering). During intensive fruit formation and bean filling, as a result of the outflow of plastic substances to the generative organs with insufficient moisture supply, the positive effect of technological methods is reduced or absent. Under conditions of high moisture supply in this variety, inoculation and treatment with humifulin promote enhanced nodule formation up to and including the bean filling phase. In the early ripening variety Orleya, the differences in the effects of the studied treatments on the nitrogen-fixing system depending on different moisture availability are weakly expressed. In 2021-2023, a correlation was established at a medium and high level between productivity and mass of nodules $r = 0.634-0.763$; in 2022 – between the number of nodules and their mass and nitrogenase activity at a high level $r = 0.709-0.845$. In the dry year 2023, a negative relationship was noted between productivity and nitrogenase activity $r = -0.532$.*

Thus, inoculation of seeds with symbiotic microorganisms and the use of foliar fertilizing with humic fertilizers when cultivating soybeans are environmentally friendly technological methods that allow plants to develop with minimal agrochemical impact.

Keywords: soybean, symbiotic activity, foliar feeding, productivity.

Введение

Азотфиксация принадлежит к числу глобальных биологических процессов, обеспечивающих существование жизни на земле. Общая мировая биологическая фиксация азота составляет 10^7-10^9 тонн N_2 в год. Симбиотическое взаимодействие с ризобиями обеспечивает растения азотом, способствует адаптации растительного организма к

абиотическим стрессам (высокая температура и недостаток влаги, повышенная кислотность, техногенное загрязнение), защищает от патогенов и вредителей [1]. В современной концепции земледелия бобовые культуры, благодаря способности образовывать мутуалистический бобово-ризобиальный симбиоз с клубеньковыми бактериями, играют ключевую роль в технологиях растениеводства, восстанавливающих плодородие почвы [2, 3]. Использование взаимосвязи микроорганизмов с растениями в сельском хозяйстве создает предпосылки для перехода к экологически устойчивому земледелию, в котором производство продукции осуществляется при минимальной нагрузке на окружающую среду и экономически более выгодно, чем при интенсивном земледелии [4, 5, 6].

Популяции ризобий, обитающие в почве, постепенно теряют свою эффективность. Для усиления азотфиксации и продуктивности симбиоза необходимо ежегодное внесение активных штаммов бактерий путем применения биологических препаратов [7, 8, 9].

Некорневое питание растений в настоящее время является стандартным технологическим приемом, который позволяет растениям быстро и эффективно регулировать обмен веществ, противостоять стрессам различной напряженности, а также исключает поглощение элементов почвой и снижает общую потребность в них [10, 11, 12].

Взаимодействие микробов и растений рассматривается как эффективный, но недостаточно исследованный резерв повышения урожайности и минимизации экологического риска в современном земледелии. В связи с этим **цель** работы состояла в изучении ризобиального симбиоза сои и влияния некорневых подкормок на его продуктивность в различных погодных условиях.

Материал и методы исследований

В 2021-2023 гг. в полевом опыте исследовались **детерминантный сорт Орлея** (селекции ФНИЦ ЗБК, внесен в Государственный реестр селекционных достижений РФ в 2024 г.) и **индетерминантный сорт Лидер 10** (селекции ООО «АСТ», внесен в Государственный реестр селекционных достижений РФ в 2020 г.).

Семена перед посевом обрабатывались ризоторфином, содержащим штамм ризобий 634а – 250 г на гектарную норму семян и гумифулином – 300 мл концентрата +12 л воды/т семян. В фазу бутонизации проводилось опрыскивание растений гумифулином 2 л концентрата + 300 л воды/га. Гумифулин представляет собой комплекс гуминовых кислот, фульвокислот и их солей. В его состав также входят азот, фосфор, калий.

Схема опыта включала следующие варианты:

1. Контроль (к),
2. Инокуляция (ин),
3. Обработка гумифулином (г),
4. Инокуляция плюс обработка гумифулином (ин + г).

Предшествующая культура – озимая пшеница. Почва опытных участков тёмно-серая лесная суглинистая. С мощностью гумусового горизонта 30...35 см., влажностью устойчивого завядания 9,7% от объёма почвы. Содержание гумуса в пахотном горизонте (по Тюрину) 4,3...5,6%, легкогидролизующего азота (по Кононовой и Тюрину) 6,4...10,1 мг/100 г почвы, обменного калия (по Масловой) 7...15 мг/100 г почвы, подвижного фосфора (по Кирсанову) 6,8...16,5 мг/100 г почвы, сумма поглощённых оснований (по Каплену) 18,5...26,2 мг-экв./100 г почвы, степень насыщенности основаниями 83...91%, рН солевой вытяжки п(о Алямовскому) 5,3...6,0, гидролитическая кислотность (по Каплену) 1,7...6,3 мг-экв./100 г почвы. Сорта выращивали на делянках 10 м² в 4-х кратной повторности по принятой для зоны технологии.

В исследованиях осуществляли учёт и наблюдения в соответствии с действующими методическими рекомендациями: отбор проб для анализа в фазы бутонизации, цветения, плодообразования и полного созревания (*Методические указания по проведению полевых опытов с кормовыми культурами, 1997*); изучение динамики формирования и накопления зелёной массы (*Методика проведения полевых агротехнических опытов с масличными культурами, 2010*); изучение симбиотической деятельности – (*Г.С. Посыпанов. Методы изучения биологической фиксации азота воздуха. 1991*). Нитрогеназную активность

определяли с помощью газового хроматографа ФГХ-1. Математическая обработка данных с целью выявления существенных различий проводилась с помощью дисперсионного анализа (Б.А. Доспехов, 1985).

Результаты и их обсуждение

Соя наиболее требовательна к влаге в фазы всходов, цветения и плодообразования. Для симбиотической системы, которая начинает развиваться через 6-7 дней после всходов, оптимальной влагообеспеченностью является 60-70% ПВ. В засушливых условиях количество клубеньков снижается по сравнению с влажными годами в 0,5-2,5 раза, масса клубеньков – в 0,5-4,0 раза [13, 14]. В 2021 и 2023 гг. количество осадков за период май-июнь (всходы – бутонизация) оказалось ниже среднемноголетних значений на 14,0-46,0 мм, ГТК составил 1,9 и 1,5 соответственно (табл. 1). В 2022 г. в это время осадков выпало на 30,0 мм больше среднемноголетних, ГТК равен 2,9. Таким образом, в 2022 г. для развития ризобий сложились наиболее благоприятные по влагообеспеченности условия. В среднем по сортам количество клубеньков в период бутонизация – начало цветения в 2022 г. составило 16,3 на растении, сухая масса – 43,32 мг/растение, что выше в 3-5 раз по сравнению с 2021 и 2023 гг. (табл. 1, 2).

Сорта сои различались по реакции симбиотической системы на технологические приемы. У сорта Лидер 10 в 2021 г. в вариантах с обработкой количество клубеньков ниже контроля, в 2022 г. инокуляция и обработка гумифулином привели к росту числа клубеньков на 5,0-29,0%, в наименее влагообеспеченном 2023 г. – на 60,0-360,0%. У сорта Орлея отмечен положительный эффект на 24,0-129,0% во все годы исследования в вариантах с гумифулином. В среднем за 3 года у Лидера 10 максимальное количество клубеньков 8,4 шт./растение наблюдалось в варианте с инокуляцией, у Орлея – 12,3 шт./растение при совместном применении инокуляции и гумифулина.

Таблица 1

Количество клубеньков на 1 растении. Бутонизация – начало цветения

Вариант	2021 г.	2022 г.	2023 г.	\bar{x}
Лидер 10				
к	6,80	10,90	2,00	6,57
ин	5,30	14,10	5,80	8,40
г	3,30	12,20	9,20	8,23
ин+г	6,30	11,40	3,20	6,97
Орлея				
к	5,00	16,20	3,10	8,10
ин	4,50	17,80	4,90	9,07
г	6,20	25,30	3,80	11,77
ин+г	7,30	22,60	7,10	12,33
\bar{x}	5,59	16,31	4,89	
НСР ₀₅	3,44	2,69	0,88	

Сухая масса клубеньков в благоприятном 2022 г. достоверно выше у сорта Лидер 10 в вариантах с инокуляцией, у Орлея – в вариантах с гумифулином; в слабо засушливом 2023 г. – у Лидера 10 в вариантах с инокуляцией и гумифулином, у Орлея при совместном применении инокуляции и гумифулина (табл. 2). Наибольшая сухая масса отмечена в 2022 г. у Лидера 10 в варианте с инокуляцией 59,1 мг/растение, у Орлея в варианте с гумифулином 60,9 мг/растение. По 3-х летним данным в период бутонизация – начало цветения у сорта Лидер 10 все технологические приемы оказывали положительное влияние на массу клубеньков, максимально – в варианте с инокуляцией, где этот показатель достигал 29,9 мг/растение, что выше контроля на 44,0%. Сорт Орлея наиболее отзывчив на гумифулин, так как в 3 и 4 вариантах масса клубеньков выше контроля на 85,0% и составляет 26,0 мг/растение.

Таблица 2

Сухая масса клубеньков, мг/растение. Бутонизация – начало цветения

Вариант	2021 г.	2022 г.	2023 г.	\bar{x}
Лидер10				
к	8,96	41,99	11,31	20,75
ин	6,14	59,05	24,36	29,85
г	9,15	46,82	22,15	26,04
ин+г	11,20	52,74	9,00	24,31
Орлея				
к	10,75	21,70	9,68	14,04
ин	6,05	24,01	11,84	13,97
г	5,77	60,86	11,60	26,08
ин+г	9,27	39,39	29,44	26,03
\bar{x}	8,41	43,32	16,17	
НСР ₀₅	5,84	5,74	3,18	

В период плодообразование – налив бобов симбиотическая система продолжала развиваться, достигая следующих показателей: в среднем по сортам количество клубеньков в 2021 г. – 10,4 шт. на растении, в 2022 г. – 27,1 шт., в 2023 г. – 25,1 шт.; масса клубеньков в 2021 г. 57,6 мг/растение, в 2022 г. – 240,0 мг, в 2023 г. – 191,0 мг. Количество клубеньков в 2022 и 2023 гг. мало отличалось, однако масса клубеньков в 2022 г. выше, чем в 2023 г. на 26,0%. В 2021 г. по сравнению с последующими годами исследования количество клубеньков ниже в 2,5 раза, масса клубеньков меньше в 3,0-4,0 раза.

В среднем за 3 года в период плодообразование – налив бобов максимальное количество клубеньков у сорта Лидер 10 сформировано в варианте с инокуляцией 30,2 шт. / растение, масса клубеньков – в варианте с гумифулином 222,1 мг/растение; у сорта Орлея наибольшее количество клубеньков в варианте с гумифулином 21,2 шт./растение, масса клубеньков в варианте инокуляция + гумифулин 166,1 мг/растение (рис. 1, 2).

Технологические приемы в этот период в среднем за 3 года приводили к росту количества и массы клубеньков у сорта Лидер 10 на 22,0-72,0%, у сорта Орлея – на 7,0-22,0%, за исключением варианта Лидер 10 инокуляция + гумифулин, в котором эти показатели были ниже контроля. Инокуляция и некорневые подкормки в период плодообразование – налив бобов для сорта Лидер 10 оказались наиболее эффективными во влажном 2022 г.: по сравнению с контролем количество клубеньков увеличивалось на 36,0-179,0%, а их масса – на 30,0-111,0%.

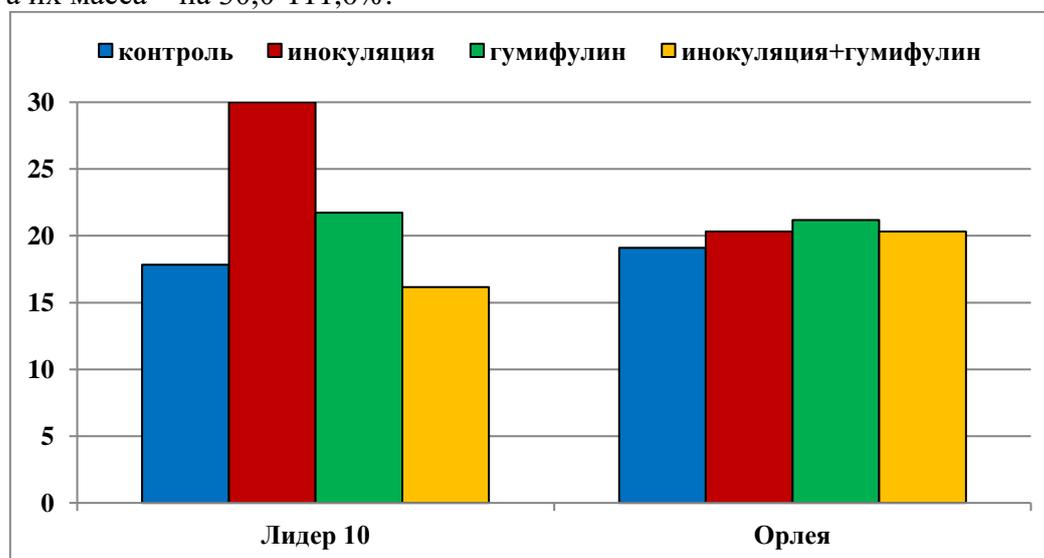


Рис. 1. Количество клубеньков на 1 растении сои, плодообразование-налив бобов, среднее за 2021-2023 гг.

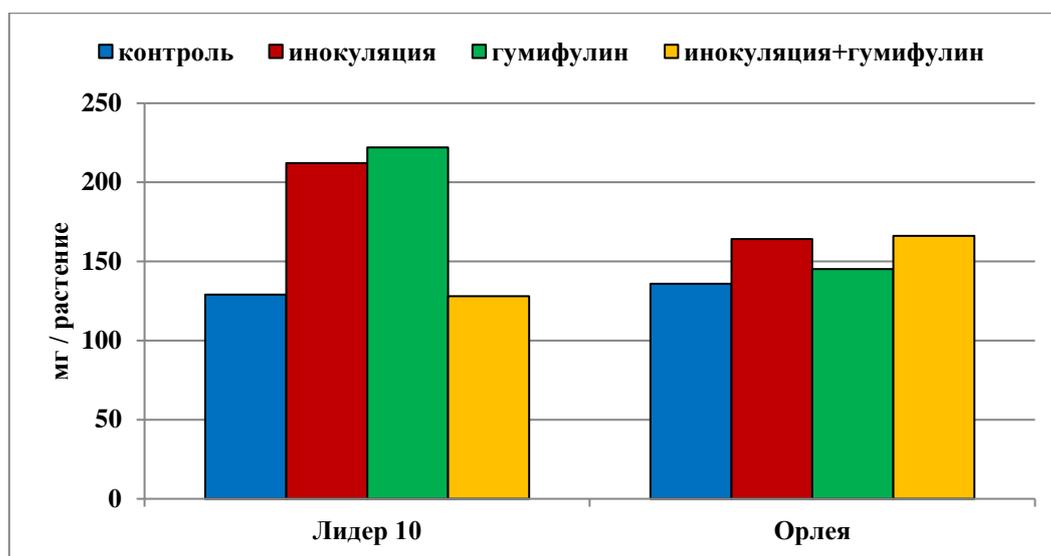


Рис. 2. Сухая масса клубеньков на растении сои, плодообразование-налив бобов, среднее за 2021-2023 гг.

В 2022-2023 гг. исследована нитрогеназная активность азотфиксирующих бактерий (табл. 3). Из-за засушливых условий в 2023 г. симбиотическая система сои в условиях стресса отличалась пониженным количеством и массой клубеньков и активностью нитрогеназы по сравнению с 2022 г. В 2023 г. активность нитрогеназы ниже, чем в 2022 г. в 1,5 раза. Однако в 2023 г. в фазу налива бобов этот показатель выше, чем в фазу цветения на 20,0% и составляет в среднем по сортам 4,83 мкг N₂/мл/час /1 растение (рис. 3). То есть к периоду налива бобов симбиотическая система в определенной степени справилась со стрессом.

У сорта Лидер 10 в 2022 г. и 2023 г. в налив бобов активность нитрогеназы достоверно выше в варианте с инокуляцией 15,56 и 5,10 мкг N₂/мл/час /1 растение соответственно, у сорта Орлея – в 2022 г. в варианте инокуляция + гумифулин 9,42 мкг N₂/мл/час /1 растение. В неблагоприятном 2023 г. у сорта Орлея нитрогеназная активность в вариантах с технологическими приемами ниже контроля.

Таблица 3

Нитрогеназная активность симбиотических азотфиксирующих бактерий, налив бобов

Вариант	Количество фиксированного азота, мкг N ₂ /мл/час /1 растение		
	2022 г.	2023 г.	\bar{x}
Лидер 10			
к	6,97	4,42	5,69
ин	15,56	5,10	10,33
г	5,04	4,48	4,76
ин+г	3,33	4,71	4,02
Орлея			
к	6,16	5,48	5,82
ин	6,08	5,24	5,66
г	4,85	4,57	4,71
ин+г	9,42	4,68	7,05
\bar{x}	7,18	4,84	6,01
НСР ₀₅	1,34	0,42	

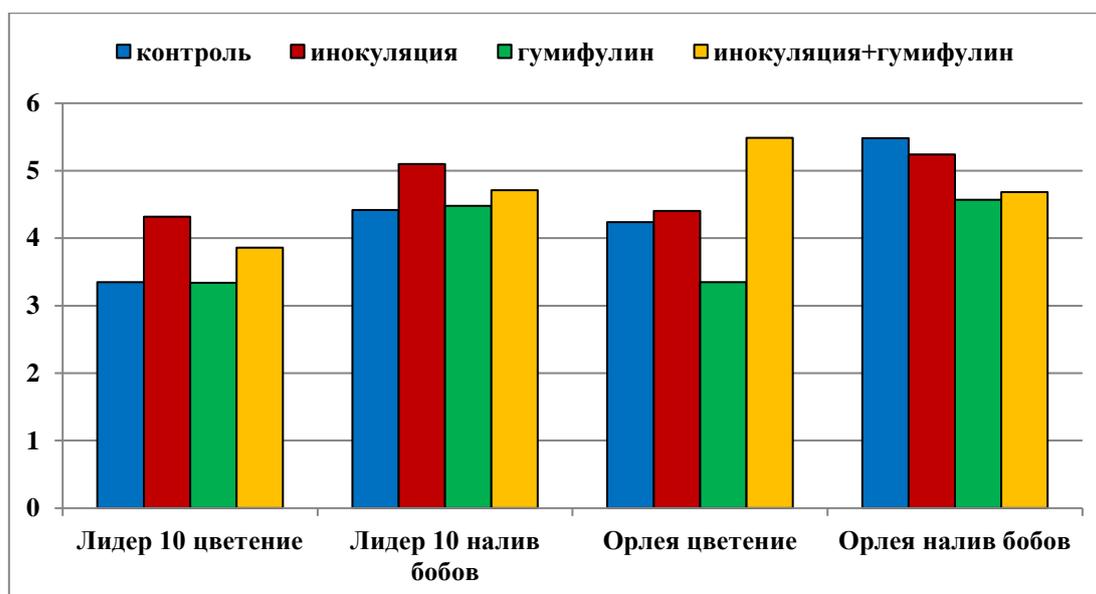


Рис. 3. Нитрогеназная активность симбиотических азотфиксирующих бактерий, 2023 г. Количество фиксированного азота, мкг N₂/мл/час /1 растение

Развитая симбиотическая система и ее высокая азотфиксирующая активность в вариантах с инокуляцией и некорневыми подкормками гумифулином положительно влияли на зерновую продуктивность сортов сои, которая увеличивалась по сравнению с контролем на 25,0-49,0% (табл. 4). Максимальная продуктивность в среднем за 3 года наблюдалась в варианте с гумифулином у сорта Лидер 10 – 15,04 г/растение, у сорта Орлея – 12,14 г/растение. В среднем по вариантам масса зерна в годы исследований была на одном уровне 11,2-11,9 г/растение. Массивная симбиотическая система, сформированная в условиях высокой влагообеспеченности в 2022 г. (ГТК за период всходы – полная спелость составил 2,3), требует большого количества питательных веществ и становится конкурентом генеративных органов. В годы с меньшим количеством осадков (в 2021 ГТК=1,9, в 2023 г. ГТК=1,3) распределение пластических веществ является оптимальным для образования плодов.

Таблица 4

Зерновая продуктивность сортов сои, г/растение

Вариант	2021 г.	2022 г.	2023 г.	\bar{x}
Лидер10				
к	11,38	10,50	10,04	10,64
ин	11,78	16,97	12,59	13,78
г	9,91	15,23	19,98	15,04
ин+г	15,64	14,58	10,38	13,53
Орлея				
к	9,43	7,00	8,04	8,16
ин	11,98	9,44	9,12	10,18
г	14,91	10,18	11,32	12,14
ин+г	10,66	10,43	12,97	11,35
\bar{x}	11,17	11,60	11,93	
НСР ₀₅	2,24	2,46	0,93	

В 2021-2023 гг. установлена корреляция на среднем и высоком уровне между продуктивностью и массой клубеньков $r=0,634-0,763$; в 2022 г. – между количеством клубеньков и их массой и нитрогеназной активностью на высоком уровне $r=0,709-0,845$. В засушливом 2023 г. отмечена отрицательная зависимость между продуктивностью и нитрогеназной активностью в налив бобов $r=-0,532$.

Заключение

Для развития симбиотической системы сои наиболее благоприятными являются годы с высокой влагообеспеченностью (ГТК=2,3). Однако значительная масса клубеньков в этом случае является конкурентом плодовых органов при распределении питательных веществ, что приводит к снижению зерновой продуктивности.

Инокуляция и некорневые подкормки гумифулином в среднем по 3-х летним данным увеличивают в течение вегетации количество клубеньков у сортов сои на 24,0%, массу клубеньков – на 37,0%, в результате чего продуктивность возрастает на 35,0%.

В слабо засушливых условиях для развития симбиотической системы сорта Лидер 10 инокуляция и некорневые подкормки гумифулином наиболее эффективны в начальный период развития (бутонизация – начало цветения). Во время интенсивного плодообразования и налива бобов в результате оттока пластических веществ к генеративным органам при недостаточной влагообеспеченности положительное влияние технологических приемов снижается или отсутствует. В условиях высокой влагообеспеченности у этого сорта инокуляция и обработка гумифулином способствуют усиленному клубенькообразованию до фазы налив бобов включительно. У скороспелого сорта Орлея различия в воздействии исследованных обработок на азотфиксирующую систему в зависимости от различной влагообеспеченности слабо выражены.

В 2021-2023 гг. установлена корреляция на среднем и высоком уровне между продуктивностью и массой клубеньков $r=0,634-0,763$; в 2022 г. – между количеством клубеньков и их массой и нитрогеназной активностью на высоком уровне $r=0,709-0,845$. В засушливом 2023 г. отмечена отрицательная зависимость между продуктивностью и нитрогеназной активностью в налив бобов $r=-0,532$.

Таким образом, инокуляция семян симбиотическими микроорганизмами и применение некорневых подкормок гуминовыми удобрениями при возделывании сои представляют собой экологически безопасные технологические приемы, позволяющие растениям развиваться при минимальном агрохимическом воздействии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по Гранту 075-15-2021-546.

Литература

1. Проворов Н.А., Онищук О.П. Эволюционно-генетические основы симбиотической инженерии растений: мини-обзор // *Сельскохозяйственная биология*. – 2018. – Том 53. – № 3. – С. 464-474.
2. Штарк О.Ю., Борисов А.Ю., Жуков В.А. и др. Многокомпонентный симбиоз бобовых с полезными почвенными микроорганизмами: генетическое и эволюционное обоснование использования в адаптивном растениеводстве // *Экологическая генетика*. – 2011. – Т. 9. – № 2. – С. 80-94.
3. Graham P.H., Vance C.P. et al. Genetic analysis of ethylene regulation of legume nodulation // *Plant Signaling & Behavior*. – 2009. – V. 4. – P. 818-823.
4. Проворов Н.А., Тихонович И.А. Сельскохозяйственная микробиология и симбиогенетика: синтез классических идей и конструирование высокопродуктивных агроценозов (обзор) // *Сельскохозяйственная биология*. – 2022. – Том 57. – № 5. – С. 821-831.
5. Тихонович И.А., Проворов Н.А. Сельскохозяйственная микробиология как основа экологически устойчивого агропроизводства: фундаментальные и прикладные аспекты // *Сельскохозяйственная биология*. – 2011. – № 3. – С. 3-9.
6. Masson-Boivin C., Sachs J.L. Symbiotic nitrogen fixation by rhizobia-the roots of a success story // *Curr. Opin. Plant Biol.* – 2018. – V. 44: P. 7-15 (DOI: 10.1016/j.pbi.2017.12.001).
7. Сытников Д.М., Шейко Е.А. Продуктивность симбиоза при инокуляции сои различными препаративными формами ризобий и их Tn5-мутантами // *Экосистемы*. – 2021. – № 28. – С. 76-81.

8. Зайцев Н.И., Агафонов О.М., Шабалдас О.Г. и др. Образование клубеньков в зависимости от предпосевной обработки семян сои бактериальными препаратами // Масличные культуры. – 2017. – Вып. 1 (169). – С. 64-68.
9. Тильба В.А., Тишков Н.М., Махонин В.Л. и др. Влияние клубеньковых бактерий на формирование вегетативной массы сои и развитие симбиотического аппарата на черноземе выщелоченном // Масличные культуры. – 2020. – Вып. 1 (181). – С. 79-87. DOI: 10.25230/2412-608X-2020-1-181-79-87
10. Niewiadomska A., Sulewska H., Wolna-Maruwka et al. The influence of biostimulants and foliar fertilizers on the process of biological nitrogen fixation and the level of soil biochemical activity in soybean (*Glycine max L.*) cultivation // Applied Ecology and Environmental Research, – 2019. – 17 (5). – P. 12649-12666.
11. Маржохова М.Х., Кашукоев М.В. Эффективность некорневой подкормки сои микроудобрениями (обзор) // Масличные культуры. – 2022. – Вып. 2 (190). – С. 77-88. DOI: 10.25230/2412-608X-2022-2-190-77-88
12. Шабалкин А.В., Дубинкина Е.А. Применение инокулянта и микроудобрений на сое в условиях Центрального Черноземья // Масличные культуры. – 2023. – Вып. 1 (193). – С. 86-93. DOI: 10.25230/2412-608X-2023-1-193-86-93
13. Golovina E.V. Symbiotic nitrogen fixation of northern ecotype soybean varieties cultivated in the conditions of the central black earth region // Lecture notes in networks and systems, – 2022. – Том 372. – С. 101-112.
14. Головина Е.В., Леухина О.В. Влияние некорневых подкормок на фотосинтетическую деятельность, симбиотическую активность и продуктивность новых сортов сои // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2023. – № 1 (45). – С.40-49. DOI: 10.24412/2309-348X-2023-1-40-49

References

1. Provorov N.A., Onishchuk O.P. Evolutionary genetic foundations of symbiotic engineering of plants: mini-review // *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2018, Vol. 53, no. 3, pp. 464-474. (In Russ.)
2. Shtark O. Yu., Borisov A. Yu., Zhukov V. A. et al. Multicomponent symbiosis of legumes with beneficial soil microorganisms: genetic and evolutionary rationale for use in adaptive crop production // *Ekologicheskaya genetika*, 2011, Vol. 9, no. 2, pp. 80-94. (In Russ.)
3. Graham P. H., Vance C. P. et al. Genetic analysis of ethylene regulation of legume nodulation // *Plant Signaling & Behavior*, 2009, V. 4, P. 818-823.
4. Provorov N.A., Tikhonovich I.A. Agricultural microbiology and symbiogenetics: synthesis of classical ideas and construction of highly productive agrocenoses (review) // *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2022, Vol. 57, no. 5, pp. 821-831. (In Russ.)
5. Tikhonovich I.A., Provorov N.A. Agricultural microbiology as the basis for environmentally sustainable agricultural production: fundamental and applied aspects // *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2011, no. 3, pp. 3-9. (In Russ.)
6. Masson-Boivin C., Sachs J.L. Symbiotic nitrogen fixation by rhizobia-the roots of a success story // *Curr. Opin. Plant Biol.*, 2018, V. 44: P. 7-15 (DOI: 10.1016/j.pbi.2017.12.001).
7. Sytnikov D.M., Sheiko E.A. Productivity of symbiosis when soybean is inoculated with various preparative forms of rhizobia and their Tn5-mutanates // *Ekosistemy*, 2021, no. 28, pp. 76-81. (In Russ.)
8. Zaitsev N.I., Agafonov O.M., Shabaldas O.G. et al. Formation of nodules depending on the pre-sowing treatment of soybean seeds with bacterial preparations // *Maslichnye kul'tury*, 2017, Iss. 1 (169), pp. 64-68. (In Russ.)
9. Til'ba V.A., Tishkov N.M., Makhonin V.L. et al. The influence of nodule bacteria on the formation of the vegetative mass of soybeans and the development of the symbiotic apparatus on leached chernozem // *Maslichnye kul'tury*, 2020, Iss. 1 (181), pp. 79-87. (In Russ.) DOI: 10.25230/2412-608X-2020-1-181-79-87
10. Niewiadomska A., Sulewska H., Wolna-Maruwka et al. The influence of biostimulants and foliar fertilizers on the process of biological nitrogen fixation and the level of soil biochemical

activity in soybean (*Glycine max L.*) cultivation // *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17 (5), P. 12649-12666.

11. Marzhokhova M.Kh., Kashukoev M.V. Efficiency of foliar feeding of soybeans with microfertilizers (review) // *Maslichnye kul'tury*, 2022, Iss. 2 (190), pp. 77-88. (In Russ.) DOI: 10.25230/2412-608X-2022-2-190-77-88

12. Shabalkin A. V., Dubinkina E. A. Application of inoculant and microfertilizers on soybeans in the conditions of the Central Black Earth Region // *Maslichnye kul'tury*, 2023, Iss. 1 (193), pp. 86-93. (In Russ.) DOI: 10.25230/2412-608X-2023-1-193-86-93

13. Golovina E.V. Symbiotic nitrogen fixation of northern ecotype soybean varieties cultivated in the conditions of the central black earth region // *Lecture notes in networks and systems*, 2022, Vol. 372, pp. 101-112. (In Russ.)

14. Golovina E.V., Leukhina O.V. The influence of foliar fertilizing on photosynthetic activity, symbiotic activity and productivity of new soybean varieties // *Zernobobovye i krupyanye kul'tury*, 2023, no. 1 (45), pp. 40-49. (In Russ.) DOI: 10.24412/2309-348X-2023-1-40-49