

DOI: 10.24412/2309-348X-2026-2-39-49

УДК: 633.358:633.34:631.461.52(571.56)

## ВЛИЯНИЕ ПРЕПОСЕВНОЙ ИНОКУЛЯЦИИ КЛУБЕНЬКОВЫМИ БАКТЕРИЯМИ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ГОРОХА ПОСЕВНОГО И СОИ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Т.С. СЛЕПЦОВ<sup>1,2</sup>, аспирант, ORCID:0000-0002-2839-0851, E-mail: slepsovtimur00@gmail.com

Е.В. СЕМЕНОВА<sup>1</sup>, кандидат биологических наук, ORCID 0000-0002-2637-1091

И.В. СЕФЕРОВА<sup>1</sup>, кандидат биологических наук, ORCID 0000-0003-3308-9198

Д.С. КАРЛОВ<sup>3</sup>, кандидат биологических наук, ORCID 0000-0002-9030-8820

А.Н. НЕУСТРОЕВ<sup>2</sup>, кандидат сельскохозяйственных наук, ORCID 0000-0002-8527-4178,

Л.Ю. НОВИКОВА<sup>1</sup>, доктор сельскохозяйственных наук, ORCID 0000-0003-4051-3671

<sup>1</sup> ФГБНУ ФИЦ ВИГРР ИМЕНИ Н.И. ВАВИЛОВА, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

<sup>2</sup> ЯКУТСКИЙ НИИСХ ИМЕНИ М.Г. САФРОНОВА – ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ФИЦ ЯНЦ СО РАН, ЯКУТСК

<sup>3</sup> ФГБНУ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МИКРОБИОЛОГИИ» ПУШКИН, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

**Аннотация.** Представлены результаты первого полевого испытания предпосевной инокуляции гороха посевного (*Pisum sativum* L.) и сои культурной (*Glycine max* L.) штаммами клубеньковых бактерий в условиях Центральной Якутии (61° с.ш.). Опыт проведен в 2025 г. на полях Якутского НИИСХ. Для гороха (51 образца из коллекции ВИР) были использованы штаммы *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* RCAM1079 и *R. brockwellii* RCAM05664, выделенные соответственно из клубенька *Pisum sativum* L. (Украина) и *Vicia cracca* L. (арктическая Якутия), из коллекции ВНИИСХМ; для сои (10 образцов) – биопрепарат Ультрастим (*Bradyrhizobium japonicum*). Установлено, что предпосевная обработка штаммом RCAM1079 достоверно увеличила число клубеньков гороха на 11% к контролю ( $p < 0,001$ ). Штамм RCAM05664 арктического происхождения достоверного эффекта не показал. Выявлена слабая обратная корреляция между числом клубеньков в контроле и приростом после инокуляции штаммом RCAM1079 ( $r = -0,34$ ), согласующаяся с гипотезой конкуренции интродуцированных и аборигенных штаммов. Инокуляция сои препаратом Ультрастим обеспечила образование клубеньков у 13 из 15 обработанных растений при полном их отсутствии в контроле и сопровождалась положительным влиянием на высоту растения, число бобов, узлов с бобами и семян на растении у части сортов. Наиболее сильную реакцию показал сорт ПЭП2 (+26% бобов, +35% семян), умеренную – Светлая (+28% бобов, +13% семян), нейтральную – Fiskeby V. Результаты указывают на перспективность предпосевной инокуляции сои для повышения продуктивности в субарктических условиях и целесообразность подбора оптимальных штамм-сортовых комбинаций для конкретных почвенно-климатических условий.

**Ключевые слова:** горох посевной, соя, клубеньковые бактерии, инокуляция, бобово-ризобияльный симбиоз, Якутия.

**Для цитирования:** Слепцов Т.С., Семенова Е.В., Сеферова И.В., Карлов Д.С., Неустроев А.Н., Новикова Л.Ю. Влияние предпосевной инокуляции клубеньковыми бактериями на продуктивность гороха посевного и сои в условиях Центральной Якутии. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2026. № 2 (58): 39-49. DOI: 10.24412/2309-348X-2026-2-39-49

## EFFECTS OF PRE-SOWING INOCULATION WITH NODULE BACTERIA ON THE PRODUCTIVITY ON PEA AND SOYBEAN UNDER CONDITIONS OF CENTRAL YAKUTIA

T.S. Sleptsov<sup>1,2</sup>, E.V. Semenova<sup>1</sup>, I.V. Seferova<sup>1</sup>, D.S. Karlov<sup>3</sup>, A.N. Neustroev<sup>2</sup>, L.Yu. Novikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FEDERAL RESEARCH CENTER N.I. VAVILOV ALL-RUSSIAN INSTITUTE OF PLANT GENETIC RESOURCES (VIR), Sankt-Peterburg, Russia

<sup>2</sup>M.G. SAFRONOV YAKUT SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF AGRICULTURE - DIVISION OF FRC “THE YAKUT SCIENTIFIC CENTRE OF THE SIBERIAN BRANCH OF THE RAS”, Yakutsk, Russia

<sup>3</sup>FSBSI «ALL-RUSSIA RESEARCH INSTITUTE FOR AGRICULTURAL MICROBIOLOGY» (ARRIAM), Pushkin, Sankt-Peterburg, Russia

**Abstract.** *The results of the first field trial of pre-sowing inoculation of pea (*Pisum sativum* L.) and soybean (*Glycine max* L.) with nodule bacterial strains under conditions of Central Yakutia (61° N) are presented. The experiment was conducted in 2025 at the fields of the Yakutsk Research Institute of Agriculture. For pea (51 accessions from the VIR collection), strains *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* RCAM1079 and *R. brockwellii* RCAM05664 from the ARRIAM collection were used, isolated from *Pisum sativum* L. (Ukraine) and *Vicia cracca* L. (Arctic Yakutia), respectively; for soybean (10 accessions) – the bioproduct Ultrastim (*Bradyrhizobium japonicum*). Pre-sowing treatment with strain RCAM1079 was found to significantly increase the number of pea nodules by 11% compared to control ( $p < 0.001$ ). Strain RCAM05664 of arctic origin showed no significant effect. A weak negative correlation was detected between the nodule count in the control and the increase after inoculation with RCAM1079 ( $r = -0.34$ ), consistent with the hypothesis of competition between introduced and indigenous strains. Soybean inoculation with Ultrastim resulted in nodule formation in 13 out of 15 treated plants, with no nodules in the control, and was accompanied by a positive effect on plant height, number of pods, nodes with pods, and seeds per plant in some cultivars. The strongest response was shown by cultivar PEP2 (+26% pods, +35% seeds), moderate by Svetlaya (+28% pods, +13% seeds), and neutral by Fiskeby V. The results indicate the prospect of pre-sowing soybean inoculation for improving productivity under subarctic conditions and the importance of selecting optimal strain-cultivar combinations for specific soil-climatic conditions.*

**Keywords:** pea, soybean, nodule bacteria, inoculation, legume-rhizobial symbiosis, Yakutia.

### Введение

Зернобобовые культуры (ЗБК) представляют особый интерес для сельского хозяйства северных регионов благодаря способности к симбиотической азотфиксации. В симбиозе с клубеньковыми бактериями вида *Rhizobium leguminosarum* горох, чина и чечевица способны усвоить из воздуха до 70 кг/га азота ежегодно [1]. Результаты многолетних исследований свидетельствуют, что для оптимизации азотного питания необходима предпосевная инокуляция семян микробными препаратами на основе высокоэффективных штаммов, специфичных для каждой бобовой культуры [2].

Республика Саха (Якутия), крупнейший субъект РФ, характеризуется экстремальным континентальным климатом с коротким вегетационным периодом. Наблюдающееся потепление климата создаёт предпосылки для расширения видового состава возделываемых культур [3]. Ранее показана возможность вызревания сои в Центральной Якутии [4], однако влияние предпосевной инокуляции ризобактериями на эту культуру в данном регионе не исследовалось. Первые попытки изучения эффекта применения ризобактерий (нитрагина) в Якутии, по литературным данным, проводились в 1967-1970 гг. [5] на горохе и нуте; при этом повышение урожайности гороха на 10% было отмечено лишь в одном случае. Таким образом, настоящая работа представляет собой первое за более чем полвека полевое испытание инокуляции гороха ризобактериями в Якутии и первое в регионе исследование инокуляции сои.

Важную роль во взаимоотношениях клубеньковых бактерий и бобовых растений играет температурный фактор. Наиболее интенсивная азотфиксация, как правило, наблюдается при умеренных температурах (20-25°C), однако факты обнаружения активных ризобий в почвах тундры Якутии, Аляски и Арктики свидетельствуют об их способности к адаптации в холодных условиях [6]. Перспективным направлением является изучение разнообразия арктических клубеньковых бактерий и их эффективности на культурных бобовых.

Поскольку горох и вика относятся к трибе Fabeae, штаммы *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae*, выделенные от дикорастущих представителей этой трибы, потенциально способны эффективно нодулировать данные культуры, что может быть проверено в кросс-нодулирующих опытах. С этой целью в ходе экспедиций в арктические регионы России были собраны корневые клубеньки дикорастущих бобовых, из которых выделенные штаммы были депонированы в коллекцию ВНИИСХМ [7].

**Цель работы** – оценка эффективности предпосевной инокуляции гороха посевного (*Pisum sativum* L.) и сои культурной (*Glycine max* L.) штаммами клубеньковых бактерий в полевых условиях Центральной Якутии.

#### **Материал и методы исследований**

##### **Растительный материал и место проведения опыта**

Полевой опыт проведён в 2025 г. на полях Покровского стационара Якутского научно-исследовательского института сельского хозяйства (ЯНИИСХ), расположенного в Центральной Якутии (61°51' с.ш., 129°17' в.д.). Почва участка мерзлотная таежная палевая, осолодевшая. Агрохимическая характеристика пахотного слоя по горизонтам от 0 до 40 см: рН почвы – от 7,74 до 8,14, содержание гумуса – от 3,06 до 3,38%, нитратного азота – от 0,08 до 0,10 мг/100 г, общего азота – от 0,44 до 0,46%, подвижного фосфора – от 238,77 до 276,51 мг/кг, обменного калия – от 302,54 до 333,72 мг/кг. Посев осуществлён 27.05.2025, уборка – 15-16 сентября 2025 г.

Материалом исследования послужили 51 (из них 1 стандарт) образцов гороха посевного и 10 образцов сои из коллекции ВИР. Делянки площадью 1 м<sup>2</sup> размещены рандомизированно в однократной повторности на вариант обработки для каждого сортообразца. Проведено изучение фенологии и элементов структуры урожая у 10 растений на образец по методике ВИР [8].

##### **Инокуляция клубеньковыми бактериями**

Штаммы клубеньковых бактерий получены из Сетевой биоресурсной коллекции в области генетических технологий для сельского хозяйства (ВКСМ) при ФГБНУ ВНИИСХМ (<https://arriam.ru/kollekciya-kul-tur1/>). Для гороха был использован штамм *R. leguminosarum* bv. *viciae* RCAM1079, выделенный из клубенька *Pisum sativum* L., собранного на территории Украины, и штамм *R. brockwellii* RCAM05664, выделенный из клубенька дикорастущей популяции *Vicia cracca* L. (о. Самойловский, дельта р. Лены, арктическая Якутия). По данным коллекции штамм RCAM05664 был способен формировать клубеньки на корнях гороха посевного в условиях стерильного микроvegetационного опыта, тогда как штамм RCAM1079 был получен методом экспериментальной селекции из производственного штамма 250a (RCAM1026) при пониженных температурах и отличался от штамма RCAM1026 более ранним образованием клубеньков при 8-12°C, а также повышенной азотфиксирующей активностью и эффективностью. Для сои использован биопрепарат Ультрастим (ризоторфин, ООО «ЭКОС») на основе *Bradyrhizobium japonicum*.

Предпосевная инокуляция гороха проводилась 26.05.2025 методом замачивания: семена погружали в жидкий раствор ризобактерий (6 мл препарата на 1 л воды, не менее 2 млрд КОЕ/мл) на 15 минут. Контрольные семена без инокуляции замачивались в воде на 15 минут. Инокулированы все 51 образец гороха. Для 10 образцов сои ризоторфин добавлялся вместе с семенами в почву при посеве. Во время фазы цветения измерено число клубеньков у 5 растений каждого образца.

##### **Погодные условия**

Температурные условия вегетации 2025 г. были типичными: сумма активных температур за вегетационный период (июнь – вторая декада сентября) составила 1667°C, сумма осадков – 109 мм, гидротермический коэффициент (ГТК) – 0,7.

##### **Статистическая обработка данных**

Статистическая обработка проведена в пакете Statistica 13.3. Нормальность распределения оценена по критерию Шапиро-Уилка. Для гороха распределение числа клубеньков имело выраженную правостороннюю асимметрию; после логарифмического преобразования ( $y = \lg(x + 1)$ ) распределение стало нормальным ( $p > 0,058$  для всех трёх

вариантов). Основным методом анализа данных по гороху послужил двухфакторный дисперсионный анализ главных эффектов по логарифмированным данным (факторы: образец, обработка); в связи с однократной повторностью на вариант обработки модель использовалась без явного учёта взаимодействия, а остаточная вариация включает компонент взаимодействия образец × обработка. Для оценки связей между признаками использован коэффициент корреляции Спирмена. Для сои выполнен двухфакторный дисперсионный анализ ANOVA (факторы: сорт, обработка) с использованием суммы квадратов III типа, корректной при несбалансированном дизайне. Однородность дисперсий проверена по критерию Левена. Нодуляция сои анализировалась отдельно: достоверность образования клубеньков (бинарный признак) оценён точным тестом Фишера, количественное выражение нодуляции (число клубеньков на растение) при нулевых значениях в контроле – критерием Манна-Уитни. Принят уровень значимости 5%. Масса 1000 семян исследовалась на делянку, поэтому достоверность различий сортов по этому показателю не оценивалась.

### Результаты и их обсуждение

#### Инокуляция гороха посевного

Количество клубеньков на растение варьировало от 0 до 1222 шт., усреднённое по 5 растениям на образец – от 0,3 до 199,0 шт. (табл. 1). Хотя бы одно растение (как в опыте, так и на контроле) каждого образца имело клубеньки, что свидетельствует о присутствии аборигенных ризобий в почве опытного участка. Это согласуется с данными о широком распространении клубеньковых бактерий гороха и вики [9], а также подтверждается канадскими исследованиями, показавшими наличие активных ризобий в почвах высокоширотных регионов [10].

Таблица 1

Вариабельность числа клубеньков на растение у 51 образца гороха

Вариант	Среднее	Мин. ср./образец	Макс. ср./образец	Асимм.	Мин./раст.	Макс./раст.
Контроль	46,4±6,0	0,3	179,7	1,54	0	264
RCAM 1079	51,5±6,2	0,6	156,0	2,37	0	321
RCAM05664	47,0±7,0	1,7	199,0	2,38	0	1222

Среднее число клубеньков составило в контроле 46,4 шт./растение. Двухфакторный дисперсионный анализ логарифмированных данных (факторы: образец, обработка) (рис.1) показал значимое влияние обработки штаммом 1079 на число клубеньков и достоверное различие эффектов штаммов RCAM1079 и RCAM05664 ( $p < 0,001$ ). Обработка штаммом 1079 увеличила среднее количество клубеньков на 5,1 шт./растение (11,0% к контролю). Влияние штамма RCAM05664 было недостоверным.

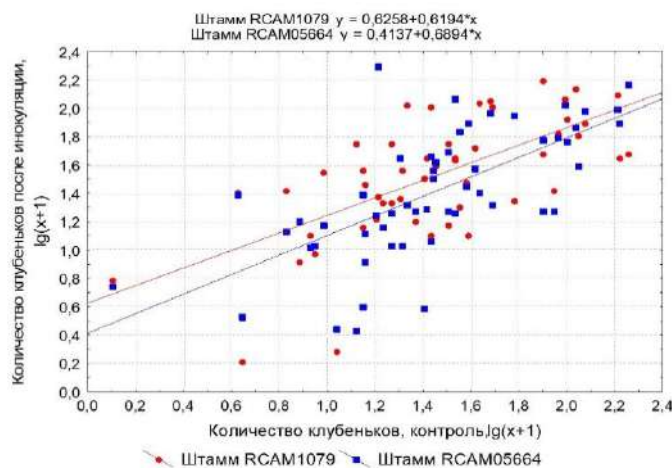


Рис. 1. Зависимость количества клубеньков на растение после инокуляции штаммами RCAM1079 и RCAM05664 от количества клубеньков в контроле (в логарифмическом масштабе)

Максимальное значение 1222 клубенька на растение (штамм 05664, табл. 1) является выбросом, вероятно связанным с индивидуальной морфологией корневой системы и физиологическим состоянием растения; при усреднении по пяти растениям на образец и логарифмическом преобразовании данных влияние этого выброса нивелируется.

Количество клубеньков при обработке разными штаммами положительно коррелировало с контролем (по Спирмену): для штамма 1079  $r = 0,65$ , для штамма 05664  $r = 0,73$ , между штаммами  $r = 0,47$ . Распределение числа клубеньков характеризовалось выраженной правосторонней асимметрией; логарифмическое преобразование обеспечивало приближение данных к нормальному распределению, что согласуется с представлениями о высокой вариабельности популяционных взаимодействий в системе «растение – микроорганизм» [9] и имеет методическое значение: в данном исследовании (корректный статистический анализ данных о клубенькообразовании потребовал предварительного логарифмического преобразования).

Слабая обратная корреляция между числом клубеньков в контроле и приростом после инокуляции штаммом 1079 ( $r = -0,34$ ) может свидетельствовать о конкурентных взаимоотношениях интродуцированных и аборигенных штаммов. Конкуренция интродуцированных и местных штаммов за нодуляцию является одним из ключевых факторов, лимитирующих эффективность инокуляции [9]. По аналогии с другими бобовыми, Prévost и Bromfield [10] на эспарцете (*Onobrychis viciifolia*) показали, что конкурентоспособность арктических штаммов при формировании клубеньков выше, чем у штаммов умеренного климата при пониженных температурах почвы. После обработки штаммом 1079 36 образцов из 51 имели большее количество клубеньков, чем в контроле.

Достоверного влияния штаммов на фенологию и элементы продуктивности гороха не выявлено на уровне всей выборки, однако ряд образцов после инокуляции штаммом RCAM1079 показал заметный прирост параметров продуктивности (табл. 2). Число клубеньков слабо положительно коррелировало с числом бобов на растении в контроле ( $r = 0,38$ ) и после обработки штаммом 1079 ( $r = 0,31$ ).

Штамм *R. brockwellii* RCAM05664, выделенный из дикорастущего бобового растения *Vicia cracca*, собранного в дельте р. Лены в арктической зоне Якутии, успешно нодулирует растение-хозяина, но не показывает достоверного эффекта на культурном горохе. Отсутствие положительного эффекта может быть связано как с низкой специфичностью данного штамма к генотипам культурного гороха, так и, в условиях полевых опытов, с его низкой конкурентоспособностью по сравнению с аборигенными ризобиями. Предпосевная обработка штаммом RCAM05664 представляет существенный интерес в контексте мировых исследований, высоко адаптированных к холоду ризобий. Аналогичный подход успешно апробирован в Канаде: Prévost et al. [11] продемонстрировали, что арктические штаммы *Mesorhizobium* были более эффективны на эспарцете, чем коммерческие штаммы умеренного климата, причём преимущество было особенно выражено при низких температурах.

Параметры продуктивности образцов гороха с наибольшим эффектом инокуляции представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Параметры продуктивности образцов гороха с наибольшим эффектом инокуляции (2025 г.)**

Номер по каталогу ВИР	Название	Происхождение	Количество клубеньков шт.		Число бобов на раст., шт		Число семян на раст., шт		Вес семян на раст., г		Масса 1000 семян, г	
			Контроль	RCAM1079	Контроль	RCAM1079	Контроль	RCAM1079	Контроль	RCAM1079	Контроль	RCAM1079
5739	Тулунская пелюшка	Иркутская обл	23.2	108	8.0	15.9	44.0	75.1	5.1	8.7	101.8	98.0
5743	Акадана 19	Приморский край	28.6	108	8.1	13.9	23.9	51.9	3.8	6.7	184.4	129.6
10244	Retrija	Латвия	49.2	116	6.0	9.8	16.7	25.4	5.7	9.8	338.6	385
7702	Новосибирский 1	Новосибирская обл	6.4	27.2	4.7	5.5	19.3	22.5	3.8	4.8	199.0	176.8
8975	Рената	Великобритания	28	45	6.2	7.4	28.6	33.1	4.8	7.9	340.2	252.4
8755	Mika (af)	Канада	27.4	43.2	6.3	7.3	22.7	25.1	5.8	7.3	264.0	244.6
9807	Сибирский	Новосибирская обл	24.4	37.6	6.1	19.4	29.5	101.0	6.3	21.7	239.8	222.8
8412	Hja 51842	Финляндия	34	47.2	12.9	14.1	72.7	68.3	10.7	13.7	163.6	169.4
7016	Yanco Early	Австралия	42.8	55.4	7.3	9.1	39.8	48.2	7.4	9.9	181.2	198.2
10073	Тренди	Чехия	19.3	22	6.7	6.8	24.2	32.0	5.8	9.2	252.2	295

**Инокуляция сои**

Из 10 обработанных образцов сои созревания достигли три: Fiskeby V (к-5829), Светлая (к-9960) и ПЭП2 (к-10651). Инокуляция препаратом Ультрастим не повлияла на фенологию сои. Размеры выборок составили: Fiskeby V контроль n = 10, Ультрастим n = 7 (3 растения не достигли зрелости); Светлая и ПЭП2 по n = 10 в каждом варианте. Число клубеньков учитывалось у 5 растений на образец в каждом варианте. В контроле ни одно растение не имело клубеньков, что свидетельствует об отсутствии или крайне низкой численности аборигенных *Bradyrhizobium japonicum* в почве опытного участка. При обработке ризоторфином клубеньки образовались у 13 из 15 растений (точный тест Фишера, p < 0,001). Среднее число клубеньков у инокулированных растений составило: ПЭП2 – 11,8±7,6 (p = 0,007, Mann–Whitney), Светлая – 13,6±9,2 (p = 0,007), Fiskeby V – 22,8±33,5 (p = 0,072).

Влияние инокуляции на элементы структуры урожайности трех сортов сои представлено в таблице 3.

Таблица 3

**Влияние обработки препаратом Ультрастим на элементы структуры урожайности трёх сортов сои (среднее ± SE)**

Признак	Fiskeby V		Светлая		ПЭП2	
	Контроль	Инокуляция	Контроль	Инокуляция	Контроль	Инокуляция
Высота, см	34,4±1,3	33,1±0,8	35,0±1,1	37,9±0,7	29,3±0,7	35,4±1,1
Выс. ниж. боба, см	11,8±1,2	12,1±0,8	13,3±1,0	12,7±0,9	10,9±0,5	11,1±1,0
Узлов с бобами	6,8±0,3	6,3±0,5	6,0±0,4	7,0±0,4	6,1±0,2	7,4±0,4
Бобов/раст.	10,9±0,8	10,9±0,7	9,4±0,6	12,0±1,1	12,3±1,0	15,5±0,9
Бобов/узел	1,6±0,1	1,7±0,1	1,6±0,1	1,7±0,1	2,0±0,2	2,1±0,1
Семян/раст.	26,9±2,0	26,0±1,8	23,4±1,7	26,5±2,0	26,7±2,2	36,1±2,3
Семян/боб	2,5±0,1	2,4±0,1	2,5±0,0	2,2±0,1	2,2±0,1	2,3±0,0
Вес сем./раст., г	4,5±0,4	4,8±0,6	3,0±0,3	3,4±0,3	4,1±0,3	4,9±0,3
Вес сем./боб, г	0,41±0,01	0,45±0,06	0,32±0,01	0,29±0,01	0,33±0,02	0,32±0,01
Масса 1000 семян, г	198,4	135,2	122,8	132,0	151,4	134,0
Примечание: Изменение относительно контроля: Fiskeby V – высота –4%, бобов 0%, семян –3%; Светлая – высота +8%, бобов +28%, семян +13%; ПЭП2 – высота +21%, бобов +26%, семян +35%.						

Двухфакторный дисперсионный анализ выявил значимый главный эффект обработки препаратом Ультрастим для четырёх из девяти изученных признаков (табл. 4): высоты растения (p = 0,003), числа бобов на растении (p = 0,038), числа узлов с бобами (p = 0,049) и числа семян на растении (p = 0,025). Инокуляция оказала наиболее выраженный положительный эффект на высоту растения и сопровождалась увеличением числа бобов, узлов с бобами и семян в среднем по трём сортам. По остальным признакам (высота нижнего боба, число бобов на узел, число семян в бобе, масса семян с растения и масса семян в бобе) главный эффект обработки не достиг уровня значимости.

**Результаты двухфакторного дисперсионного анализа (p-значения)**

Признак	Сорт	Обработка	Сорт × Обработка
Высота растения	<0,001	0,003	0,003
Высота нижнего боба	0,103	0,956	0,875
Узлов с бобами	0,751	0,049	0,041
Бобов на растении	<0,001	0,038	0,326
Бобов на узел	0,002	0,266	0,928
Семян на растении	0,006	0,025	0,051
Семян в бобе	0,049	0,398	0,027
Вес семян на растении	<0,001	0,076	0,659
Вес семян в бобе	<0,001	0,848	0,219

Примечание: Жирным выделены значимые эффекты (p < 0,05).

Наряду с главным эффектом обработки, для ряда признаков выявлено значимое взаимодействие сорт × обработка: для высоты растения (p = 0,003), числа узлов с бобами (p = 0,041) и числа семян в бобе (p = 0,027). Выраженность эффекта Ультрастима различалась по сортам: ПЭП2 показал наиболее сильную положительную реакцию – число бобов увеличилось на 26% (12,3 → 15,5), число семян на 35% (26,7 → 36,1), высота на 21% (29,3 → 35,4 см); Светлая – умеренную положительную реакцию: число бобов +28% (9,4 → 12,0), число семян +13% (23,4 → 26,5), высота +8% (35,0 → 37,9 см); Fiskeby V – минимальную реакцию, показатели практически не различались.

Положительный эффект инокуляции на основные компоненты продуктивности сои согласуется с данными мировой литературы. В полевых опытах на северо-востоке Германии инокуляция аборигенными штаммами *Bradyrhizobium* также повышала продуктивность сои, причём эффективность штаммов зависела от конкретного сорта и условий увлажнения [12]. Различная выраженность реакции сортов на Ультрастим (от сильной у ПЭП2 до нейтральной у Fiskeby V) может объясняться генотипической специфичностью бобово-ризобияльного взаимодействия, обусловленной совместимостью эффекторных белков бактерий и рецепторов растения-хозяина [13]. Данные о нодуляции подтверждают, что Ультрастим обеспечивает образование клубеньков на почвах, лишённых аборигенных ризобий сои, причём все три сорта формировали клубеньки. Различная выраженность продуктивного отклика сортов (от сильного у ПЭП2 до нейтрального у Fiskeby V) при сходной нодуляции может определяться генотипической спецификой утилизации фиксированного азота. Опыт Скандинавии показателен: успех возделывания сои на севере определяется не только инокуляцией, но и подбором ультраранних сортов [14].

Однородность дисперсий подтверждена критерием Левена (p > 0,05) для большинства признаков, за исключением числа бобов на узел (p = 0,047) и веса семян в бобе (p = 0,009), для которых результаты ANOVA следует интерпретировать с осторожностью.

**Выводы**

1. Предпосевная обработка штаммом *R. leguminosarum* bv. *viciae* RCAM1079 из коллекции ВНИИСХМ достоверно увеличила число клубеньков гороха на 11% к контролю (p < 0,001) в полевых условиях Центральной Якутии. Достоверного влияния на параметры продуктивности на уровне всей выборки не выявлено; но по отдельным образцам гороха (табл. 2) положительный эффект инокуляции наблюдался, что указывает на необходимость оценки агрономической отдачи инокуляции в многолетних опытах.

2. Штамм RCAM05664, выделенный из дикорастущего бобового растения *Vicia cracca*, произрастающего в дельте р. Лены (арктическая Якутия), достоверного эффекта на культурном горохе не показал, вероятно, связано с тем, что аборигенные ризобии более конкурентоспособны и эффективнее вступают в ризобияльный симбиоз.

3. Наличие клубеньков на культурном горохе в контрольном варианте (46,4 шт./растение) подтверждает присутствие аборигенных ризобий в почвах Центральной Якутии. Обратная корреляция между числом клубеньков в контроле и эффектом инокуляции согласуется с гипотезой конкуренции интродуцированных и местных штаммов.

4. По предварительным данным инокуляция препаратом Ультрастим (*B. japonicum*) обеспечила образование клубеньков у 13 из 15 обработанных растений при их полном отсутствии в контроле, что свидетельствует об отсутствии или крайне низкой численности аборигенных брадиризобий сои в почвах Центральной Якутии. Инокуляция сопровождалась положительным эффектом на высоту растения, число бобов, узлов с бобами и семян на растении (табл. 3). Наиболее выраженную реакцию показал сорт ПЭП2 (+26% бобов, +35% семян), умеренную – Светлая (+28% бобов, +13% семян), нейтральную – Fiskeby V.

5. Результаты указывают на перспективность предпосевной инокуляции сои для повышения продуктивности в субарктических условиях. Вместе с тем различная отзывчивость сортов на Ультрастим подтверждает целесообразность подбора штамм-сортовых комбинаций и расширения набора испытываемых штаммов, в том числе арктического происхождения.

*Работа выполнена в рамках тем Государственного задания № FWRS-2024-0084; ГЗ № FGEM-2022-0002.*

#### Благодарности

*Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории селекции и семеноводства кормовых культур ЯНИИСХ им. М.Г. Сафронова за содействие в проведении полевых опытов.*

#### Литература

1. Кокорина А.Л., Кожемяков А.П. Бобово-ризобиальный симбиоз и применение микробиологических препаратов комплексного действия – важный резерв повышения продуктивности пахотных земель. СПб.: СПбГАУ, – 2010. – 50 с.
2. Дидович С.В., Горгулько Т.В., Пась А.Н., Алексеенко О.П., Бараташвили З.А. Скрининг штаммов клубеньковых бактерий по эффективности симбиотической азотфиксации на бобовых культурах. // Таврический вестник аграрной науки. – 2023. – № 3 (35). – С. 64-73. DOI: 10.5281/zenodo.10135164
3. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научноёмкие технологии, – 2022. – 124 с.
4. Неустроев А.Н., Алексева В.И., Бардеев И.Ф. Экологическое испытание сортов сои северного экотипа в условиях Центральной Якутии. // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 3. – С. 34-37. DOI: 10.28983/asj.y2021i3pp34-37
5. Конюхов Г.И. Земледелие Якутии. Новосибирск: РАСХН, Сиб. отд-ние, Якут. НИИСХ. – 2005. – С. 203-204.
6. Алехина И.А., Белимов А.А., Карлов Д.С. Поиск арктических бобовых растений и их бактериальных симбионтов в дельте Лены и на плато Путорана. // Российские полярные исследования. – 2023. – № 1 (51). – С. 16-19.
7. Карлов Д.С., Гуро П.В., Сазанова А.Л., Кузнецова И.Г., Тихомирова Н.Ю., Лацинский Н.Н., Павлов И.С., Белимов А.А., Сафронова В.И. Генетическое разнообразие и симбиотическая эффективность микросимбионтов чины болотной (*Lathyrus palustris* L.) и горошка мышиного (*Vicia cracca* L.), произрастающих в Арктической Якутии. // Сельскохозяйственная биология. – 2023. – Т.58. – № 3. – С. 403-415. DOI: 10.15389/agrobiology.2023.3.403rus
8. Вишнякова М.А., Александрова Т.Г., Буравцева Т.В., Бурляева М.О., Егорова Г.П., Семенова Е.В., Сеферова И.В., Степанова И.Л., Яньков И.И. Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР: пополнение, сохранение и изучение. Методические указания. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: ВИР. – 2018. – 143 с. DOI: 10.30901/978-5-905954-79-5

9. Goyal R.K., Mattoo A.K., Schmidt M.A. Rhizobial-host interactions and symbiotic nitrogen fixation in legume crops toward agriculture sustainability // *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. Art. 669404. DOI: 10.3389/fmicb.2021.669404
10. Prévost D., Bromfield E.S.P. Effect of low root temperature on symbiotic nitrogen fixation and competitive nodulation of *Onobrychis viciifolia* by strains of arctic and temperate rhizobia // *Biology and Fertility of Soils*. 1991. Vol. 12. P. 161-164. DOI: 10.1007/BF00337195
11. Prévost D., Drouin P., Laberge S., Foulds D. Cold-adapted rhizobia for nitrogen fixation in temperate regions // *Canadian Journal of Botany*. 2003. Vol. 81. P. 1153-1161. DOI: 10.1139/b03-113
12. Omari R.A., Yuan K., Anh K.T., Reckling M., Halwani M., Egamberdieva D., Ohkama-Ohtsu N., Bellingrath-Kimura S.D. Enhanced soybean productivity by inoculation with indigenous *Bradyrhizobium* strains in agroecological conditions of Northeast Germany // *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. Art. 707080. DOI: 10.3389/fpls.2021.707080
13. Тихонович И.А., Борисов А.Ю., Васильчиков А.Г., Жуков В.А., Кожемяков А.П., Наумкина Т.С., Чеботарь В.К., Штарк О.Ю., Яхно В.В. Специфичность микробиологических препаратов для бобовых культур и особенности их производства. // *Зернобобовые и крупяные культуры*. – 2012. – № 3. – С. 11-17.
14. Fogelberg F., Recknagel J. Developing soy production in central and northern Europe // *Legumes in Cropping Systems* / Eds. D. Murphy-Bokern et al. Wallingford: CAB International, 2017. P. 109-124. DOI: 10.1079/9781780644981.0109

#### References

1. Kokorina A.L., Kozhemyakov A.P. Bobovo-rizobial'nyj simbioz i primeneniye mikrobiologicheskikh preparatov kompleksnogo dejstviya – vazhnyj rezerv povysheniya produktivnosti pakhotnykh zemel' [Legume-rhizobial symbiosis and application of complex-action microbial preparations as an important reserve for increasing arable land productivity]. Saint Petersburg, SPbGAU, 2010, 50 p. (In Russian)
2. Didovich S.V., Gorgul'ko T.V., Pas' A.N. et al. Skringing shtammov kluben'kovykh bakterij po ehffektivnosti simbioticheskoy azotfiksatsii na bobovykh kul'turakh [Screening of nodule bacteria strains for symbiotic nitrogen fixation efficiency on legume crops]. *Tavrisheskij vestnik agrarnoj nauki*, 2023, no. 3 (35), pp. 64-73. (In Russian)
3. *Tretij otsenochnyj doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossijskoj Federatsii. Obshhee rezyume* [Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Executive summary]. Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii, 2022, 124 p. (In Russian)
4. Neustroev A.N., Alekseeva V.I., Bardeev I.F. Ehkologicheskoe ispytanie sortov soi severnogo ekotipa v usloviyakh Tsentral'noj Yakutii [Ecological testing of northern ecotype soybean cultivars under conditions of Central Yakutia]. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*, 2021, no. 3, pp. 34-37. DOI: 10.28983/asj.y2021i3pp34-37 (In Russian)
5. Konyukhov G.I. *Zemledelie Yakutii* [Agriculture of Yakutia]. Novosibirsk, 2005, pp. 203-204. (In Russian)
6. Alekhina I.A., Belimov A.A., Karlov D.S. Poisk arkticheskikh bobovykh rastenij i ikh bakterial'nykh simbiotov v del'te Leny i na plato Putorana [Search for arctic leguminous plants and their bacterial symbionts in the Lena Delta and on the Putorana Plateau]. *Rossijskie polyarnye issledovaniya*, 2023, no. 1 (51), pp. 16-19. (In Russian)
7. Karlov D.S., Guro P.V., Sazanova A.L. et al. Geneticheskoe raznoobrazie i simbioticheskaya ehffektivnost' mikrosimbiotov chiny bolotnoj (*Lathyrus palustris* L.) i goroshka myshinnogo (*Vicia cracca* L.), proizrastayushhikh v Arkticheskoy Yakutii [Genetic diversity and symbiotic efficiency of microsymbionts of marsh vetch and mouse pea growing in Arctic Yakutia]. *Sel'skokhozyajstvennaya biologiya*, 2023, vol. 58, no. 3, pp. 403-415. DOI: 10.15389/agrobiol.2023.3.403rus (In Russian)
8. Vishnyakova M.A., Buravtseva T.V., Burlyaeva M.O. et al. *Kollektsiya mirovykh geneticheskikh resursov zernovykh bobovykh VIR: popolnenie, sokhraneniye i izuchenie* [Collection of world genetic

- resources of grain legumes at VIR: replenishment, conservation and study]. Saint Petersburg, VIR, 2018, 143 p. DOI 10.30901/978-5-905954-79-5. (In Russian)
9. Goyal R.K., Mattoo A.K., Schmidt M.A. Rhizobial–host interactions and symbiotic nitrogen fixation in legume crops toward agriculture sustainability. *Frontiers in Microbiology*, 2021, vol. 12, art. 669404. DOI: 10.3389/fmicb.2021.669404
10. Prévost D., Bromfield E.S.P. Effect of low root temperature on symbiotic nitrogen fixation and competitive nodulation of *Onobrychis viciifolia* by strains of arctic and temperate rhizobia. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, vol. 12, pp. 161–164. DOI: 10.1007/BF00337195
11. Prévost D., Drouin P., Laberge S. et al. Cold-adapted rhizobia for nitrogen fixation in temperate regions. *Canadian Journal of Botany*, 2003, vol. 81, pp. 1153–1161. DOI: 10.1139/b03-113
12. Omari R.A., Yuan K., Anh K.T. et al. Enhanced soybean productivity by inoculation with indigenous Bradyrhizobium strains in agroecological conditions of Northeast Germany *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. Art. 707080. DOI: 10.3389/fpls.2021.707080
13. Tikhonovich I.A., Borisov A.Yu., Vasil'chikov A.G. et al. Spetsifichnost' mikrobiologicheskikh preparatov dlya bobovykh kul'tur i osobennosti ikh proizvodstva [Specificity of microbial preparations for legume crops and features of their production]. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury*, 2012, no. 3, pp. 11–17. (In Russian)
14. Fogelberg F., Recknagel J. Developing soy production in central and northern Europe. *Legumes in Cropping Systems*. Eds. D. Murphy-Bokern et al. Wallingford, CAB International, 2017, pp. 109–124 DOI 10.1079/9781780644981.0109