

УДК 631.84: 631.847.2: 581.557.2: 635.656

РЕАКЦИЯ ГОРОХА НА АЗОТНОЕ УДОБРЕНИЕ И ИНОКУЛЯЦИЮ СЕМЯН РИТОРФИНОМ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ОКУЛЬТУРЕННОСТИ

© 2023 г. М. А. Алёшин^{1,2,*}, А. А. Завалин¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

²Пермский государственный аграрно-технологический университет им. акад. Д.Н. Прянишникова
614990 Пермь, ул. Петропавловская, 23, Россия

*E-mail: matvei0704@mail.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 20.02.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Представлены результаты вегетационного опыта по установлению совместного влияния биопрепарата Ризоторфин и N-удобрения (дозы $N_{0.05}$, $N_{0.10}$, $N_{0.15}$, $N_{0.20}$, $N_{0.25}$) на формирование вегетативной массы и урожайность зерна гороха посевного при возделывании на слабо- и среднеокультуренной дерново-подзолистой почве. С повышением дозы N-удобрения с $N_{0.05}$ до $N_{0.25}$ наблюдали увеличение урожайности зеленой массы гороха на 3.4–22.2 г/сосуд (на слабоокультуренной) и на 10.3–35.5 г/сосуд (на среднеокультуренной почве). Прибавка урожая зерна от использования Ризоторфина в среднем в опыте составила 1.31 г/сосуд на слабо- и 1.66 г/сосуд на средне окультуренной почве. Внесение N-удобрения в условиях среднеокультуренной почвы повышало отзывчивость посевного гороха на инокуляцию до 1.70–1.87 г/сосуд. При использовании Ризоторфина и внесении N-удобрения увеличивалось накопление N в зерне гороха в соответствии со степенью окультуренности почвы на 0.22 и 0.18%. При использовании Ризоторфина происходило накопление N в корнях, что положительно сказалось на сохранении их активности и функционирования на более поздних этапах развития, поступления и накопления N в формирующемся зерне. Биопрепарат Ризоторфин влиял на накопление и распределение потребленного N между основной и побочной продукцией растений гороха. Благодаря этому, в фазе бутонизации—начало цветения $K_{хоз}$ увеличился до 0.83–0.88, и в зерне гороха было дополнительно аккумулировано 38.0–65.5 мг N/сосуд. С увеличением дозы N-удобрения свыше 0.05 г/кг на слабо- и 0.20 г/кг на среднеокультуренной почве процесс формирования симбиотического аппарата на корневой системе гороха полностью подавлялся.

Ключевые слова: азотное удобрение, дозы, биопрепарат Ризоторфин, окультуренность почвы, посевной горох, продуктивность, накопление азота, симбиотический аппарат.

DOI: 10.31857/S0002188123060030, **EDN:** QODPHA

ВВЕДЕНИЕ

На соотношение автотрофного и симбиотрофного путей питания азотом бобовых растений влияют не только генотипические особенности вида и культивируемого сорта. Значительное влияние оказывают эдафические условия, а также уровень плодородия почвы, воздействие которых отражается на нодуляции и активности симбиотических взаимоотношений [1]. При этом отмечено, что внешние факторы могут определять до 80% варьирования симбиотических признаков, и это влияние может быть значительно большим, чем совместное действие макро- и микросимбионта [2].

Эффективный симбиоз и азотфиксация является необходимым и первоочередным условием для интенсивного развития растений зернобобовых культур, формирования фотоассимиляционной поверхности и вегетативной массы, получения высоких и устойчивых урожаев зерна. Полноценное развитие и функционирование симбиотического аппарата на корневой системе бобовых культур снижает, а зачастую и полностью удовлетворяет их потребность в азоте. Однако при низкой эффективности азотфиксации бобовые активно используют азот почвы и удобрений, переходя на автотрофный тип питания [3].

Доля участия симбиотического азота в общем его потреблении бобовыми растениями меняется

от 0 до 95%, составляя в среднем 30–40–58% в зависимости от уровня плодородия почвы [4–7]. На низкоплодородной почве азотфиксация снижается из-за недостатка субстрата для диазотрофов. На высокоплодородной почве органического вещества достаточно для функционирования азотфиксирующей системы, кроме того, потребность растений в азоте удовлетворяется за счет текущей минерализации [8]. Эти положения определяют актуальность изысканий в этом вопросе и постановку цели исследования – более детальное изучение эффективности совместного использования N-удобрения и бактериального препарата Ризоторфин для повышения продуктивности и азотфиксирующей способности у безлисточковых сортов гороха на дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в вегетационном опыте по следующей схеме: фактор А – инокулирование посевного материала препаратом Ризоторфин (A_0 – без инокуляции, A_1 – при инокуляции), фактор Б – дозы N, г/кг абсолютно сухой почвы (B_0 – N_0 (контроль), B_1 – $N_{0.05}$, B_2 – $N_{0.10}$, B_3 – $N_{0.15}$, B_4 – $N_{0.20}$, B_5 – $N_{0.25}$). Повторность двенадцатикратная. Для закладки опыта использовали сосуды Митчерлиха (20×20), вмещающие 5 кг абсолютно сухой почвы. Влажность почвы поддерживали на уровне 60% ПВ, которая составляла 55%. В качестве объекта исследования был выбран перспективный сорт отечественной селекции посевного гороха безлисточкового морфотипа Агроинтел, рекомендуемый для зернового продовольственного использования. Азотное удобрение – N_{aa} , 34,4% д.в.

В опыте использовали пахотный слой дерново-мелкоподзолистой среднесуглинистой почвы с разных участков учебно-опытного поля Пермского ГАТУ, отличающихся по степени окультуренности: мощности пахотного слоя, величине обменной кислотности и содержания подвижного фосфора, степени насыщенности почвы основаниями. Агрохимическая характеристика слабо окультуренной дерново-подзолистой почвы: сильноокислая реакция среды (pH_{KCl} 4.4, H_r – 5.7 ммоль/100 г почвы), S (по Каппену–Гильковицу) – 12.5 ммоль/100 г почвы, степень насыщенности основаниями – средняя. Обеспеченность подвижными формами (по Кирсанову) фосфора (44 мг/кг почвы) и калия (72 мг/кг почвы) – низкая, минеральным азотом [9] – повышенная (12 мг/кг почвы). Среднеокультуренная почва характеризовалась слабоокислой реакцией

среды (pH_{KCl} 5.1, H_r – 4.1 ммоль/100 г почвы), повышенной суммой обменных оснований (S – 17.5 ммоль/100 г почвы) и степенью насыщенности основаниями (81%). Обеспеченность подвижным фосфором (59 мг/кг почвы) и калием (92 мг/кг почвы) – средняя, минеральным азотом – повышенная (17 мг/кг почвы).

Содержание подвижных форм минерального азота ($N_{мин}$) в почве определяли по методике [10]. Накопление общего N в растениях вычисляли на основании фактического содержания N (в % абсолютно сухого вещества) в зеленой массе, зерне, соломе, корнях и клубеньках, которое определяли по ГОСТ 13496.4-93. Определение интенсивности развития симбиотического аппарата на корневой системе гороха проводили согласно методике [11].

Статистическую обработку результатов исследования проводили согласно рекомендациям [12] с использованием MS Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Азотный фонд почвы является важнейшей характеристикой ее плодородия. Поведение в почве легкодоступных форм минерального азота (нитратного, аммонийного) в первую очередь связано с ее микробиологической и биохимической активностью, поглотительно-выделительной деятельностью растений и микроорганизмов. Это затрудняет выявление общих закономерностей в поведении соединений азота почвы [13]. Обеспеченность растений бобовых культур азотом является необходимым условием формирования и последующего функционирования активного бобово-ризобияльного симбиоза [14]. Для определения обеспеченности растений гороха учитывали общее содержание подвижных форм минерального азота ($N_{мин} = N-NO_3 + N-NH_4$) в пахотном слое почвы (рис. 1).

Исследование показало, что обеспеченность почвы минеральным азотом на начальном этапе развития гороха была повышенной (>10 мг/кг почвы). Это отчасти может быть обусловлено высокой нитрификационной способностью почвы и интенсивным вовлечением аммиачного азота в процессы окисления. Наиболее контрастные данные по содержанию минерального азота в почве получены в фазе ветвления стебля: на слабоокультуренной почве содержание минерального азота составляло от 12.3 до 20.9 мг/кг почвы, на среднеокультуренной почве – от 29.7 до 45.8 мг/кг почвы. Применение интродуцируемых штаммов ризобий при инокуляции способствовало более интенсивному проявлению симбиотической ак-

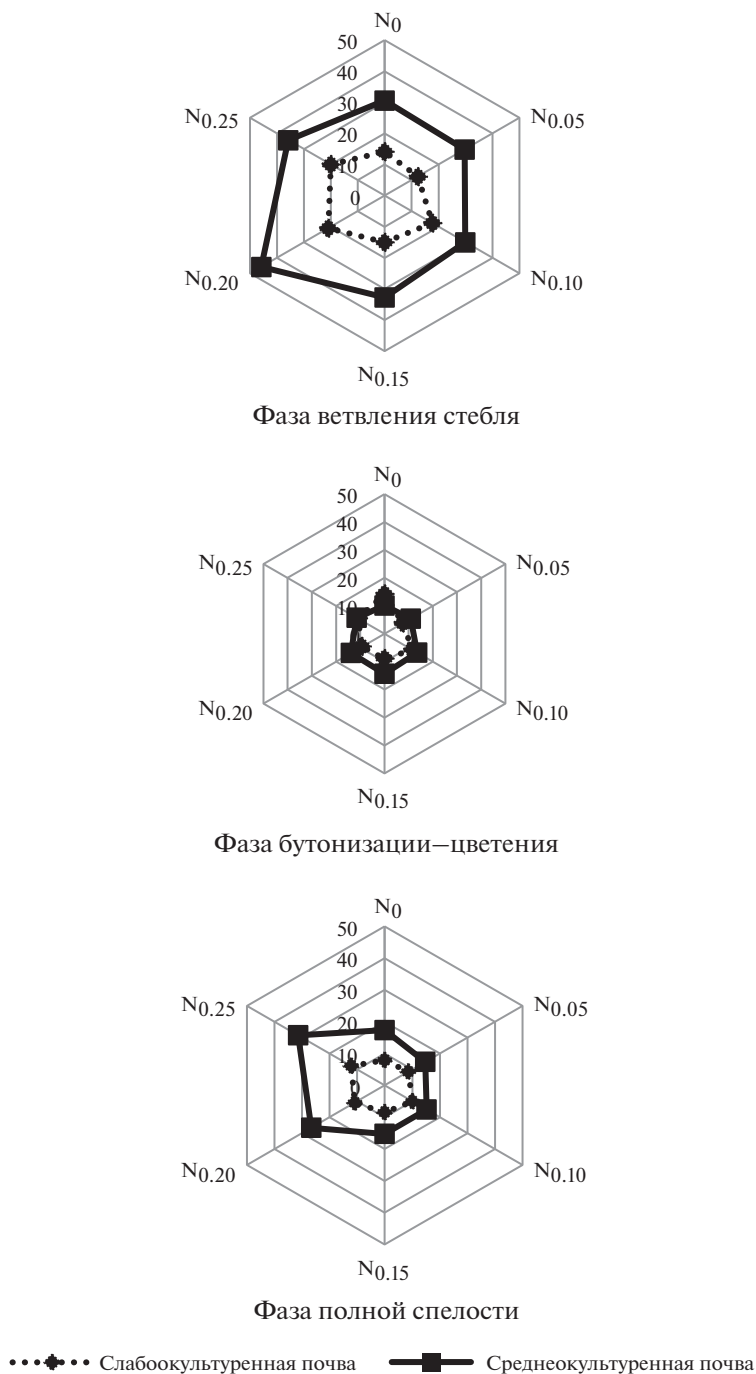


Рис. 1. Динамика содержания подвижного минерального азота ($N_{\text{мин}}$, мг/кг) в дерново-мелкоподзолистой почве в фазах развития гороха.

тивности, в результате чего растения менее активно использовали почвенные запасы азота. Более сильная корреляционная зависимость ($r = 0.79–0.86$) между дозами азота и содержанием его минеральных форм в почве была отмечена в фазе полной спелости семян. На слабоукультурной почве, на уровне тенденции зафиксировали более низкое содержание минерального азо-

та по сравнению со среднеукультурной почвенной разностью. При содержании в почве 40–50 кг N/га образование розовых клубеньков на корнях клевера задерживалось на 10–15 сут. При этом не происходило образование ферментного комплекса нитрогеназы и стимулирование его активности. Избыток NO_3^- в клетке тормозило

Таблица 1. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на урожайность зеленой массы гороха, г/сосуд

Вариант	Срок уборки (фаза развития)			
	ветвление стебля		бутонизация—начало цветения	
	1	2	1	2
N ₀	16.7	25.1	49.4	52
N _{0.05}	20.9	35.4	52.8	70
N _{0.10}	21.1	40.0	58.6	73
N _{0.15}	28.3	44.1	59.8	79
N _{0.20}	34.9	45.5	65.1	84
N _{0.25}	38.9	53.5	65.7	88
Среднее	26.8	40.6	58.6	74
HCP ₀₅	2.4	5.2	7.3	13

Примечание. В графе 1 — слабокультуренная почва, 2 — среднекультуренная почва. То же в табл. 2, 7—10.

образование аминокислот из кетокислот и аммиака. В результате снижался синтез леггемоглобина и переход его в активную форму. Однако на хорошо окультуренных почвах этого не происходило под действием азотных удобрений [15]. Вопрос азотного питания зернобобовых культур — один из наиболее сложных и до настоящего времени дискуссионный. Поэтому необходимо обобщение отечественного и зарубежного опыта по этому вопросу с тем, чтобы выявить рациональное сочетание азота минеральных удобрений и накопленного за счет азотфиксации из атмосферы.

При изучении влияния доз N и предпосевной обработки семян Ризоторфином на урожайность зеленой массы гороха получены следующие результаты (табл. 1). На основании представленных результатов можно отметить, что при уборке растений гороха на зеленую массу в фазе ветвления стебля урожайность на слабо- и среднекультуренной дерново-мелкоподзолистой почве составила 16.7–38.9 и 25.1–53.5 г сухого вещества/сосуд соответственно. В более поздний срок уборки (фаза бутонизации—начало цветения) урожайность растений в вариантах опыта увеличилась до 45.7–65.7 и 52.4–87.9 г/сосуд соответственно. Продуктивность растений на среднекультуренной почве (в среднем в опыте) на начальной стадии развития (ветвление стебля) превышала в 1.1–1.3 раза. В фазе бутонизации—начало цветения продуктивность гороха на среднекультуренной почве была больше в 1.3–1.9 раза. При возрастании доз удобрения от N₀ до N_{0.25} отмечали увеличение продуктивности растений гороха. Окупаемость азотного удобрения в условиях менее окультуренной дерново-подзолистой почвы в изученном диапазоне доз различалась не так су-

щественно. В фазе ветвления стебля она была на уровне 44.0–91.0 г/г N, в фазе бутонизации — начало цветения составляла 65.2–92.0 г/г N. На среднекультуренной почве отмечали более существенную отзывчивость растений на использование азотного удобрения (>100 г/г N). При этом более высокая окупаемость в фазах развития 149–206 г/г N и 210–346 г/г N соответственно отмечена при использовании азотного удобрения в дозах 0.05 и 0.10 г N/kg почвы.

Листья, стебли, черешки, корни и клубеньки гороха активно аккумулируют азот во время вегетативного развития вплоть до завязывания бобов. Больше всего азота накапливается в листьях. На момент формирования бобов отмечается отток азота из вегетативных органов к формирующимся семенам. Влияние азотного удобрения и предпосевной обработки семян ризоторфином на содержание азота в зеленой массе растений гороха представлено в табл. 2. На начальном этапе развития (фаза ветвления), содержание азота в вегетативной массе гороха определялось степенью окультуренности почвы. При последующем учете в фазе бутонизации—цветения более высокое содержание азота отмечено на слабокультуренной почве. Это обусловлено большей отзывчивостью растений гороха на внесение возрастающих доз N-удобрения на менее плодородной дерново-подзолистой почве. В целом в опыте можно было наблюдать возрастающий тренд в содержании азота в составе вегетативной массы растений гороха относительно использованных доз азотного удобрения. Следует отметить, что зернобобовые культуры не отзывчивы на минеральный азот удобрений лишь при оптимальных агрохимических свойствах почвы (pH, содержа-

ние элементов питания) и эдафических условиях для симбиотической азотфиксации, что в рамках конкретного производства наблюдали достаточно редко.

Эффективность доз азота и биопрепарата Ризоторфин для предпосевной инокуляции семян при уборке гороха на зерно рассмотрена в табл. 3. Согласно полученным результатам, урожайность зерна гороха на среднеокультуренной почве составила 6.91–8.64 г/сосуд, что 1.24–1.25 раза больше, чем в условиях слабоокультуренной почвы. Прибавка урожая от обработки семян гороха микробиальным препаратом Ризоторфин перед посевом составила от 1.31 г/сосуд на слабоокультуренной почве, до 1.66 г/сосуд на среднеокультуренной почве. Эффективность Ризоторфина была более устойчивой в отдельных вариантах (1.66–1.85 г/сосуд) и более существенной в среднем в опыте (1.74 г/сосуд) на среднеокультуренной почве. В условиях слабоокультуренной почвы существенная прибавка от инокуляции семян (1.23–1.98 г/сосуд) получена только при использовании более высоких доз азота ($N_{0.15}$ – $N_{0.25}$). Влияние доз азота на зерновую продуктивность растений гороха в условиях слабоокультуренной почвы было не однозначным. Изначально при внесении $N_{0.05}$ выявлена тенденция к увеличению урожая зерна. В диапазоне доз от $N_{0.05}$ до $N_{0.20}$ (без инокуляции) и от $N_{0.05}$ до $N_{0.15}$ (при инокуляции посевного материала) наблюдали существенное снижение урожая. Повышение доз N до 0.25 г/кг почвы в обоих случаях способствовало существенному росту зерновой продуктивности гороха до 6.38 и 8.29 г/сосуд соответственно. Есть все основания предполагать, что в этих условиях растения посевного гороха переходят на автотрофный тип питания азотом внесенного удобрения. На основании урожайных данных следует сказать об эффективности совместного использования инокуляции посевного материала и минерального азота в условиях слабоокультуренной почвы при возделывании гороха на зеленую массу. При возделывании гороха на зерно эффективно одностороннее использование инокуляции посевного материала микробиальным препаратом Ризоторфин. На дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности уже при внесении $N_{0.05}$ отмечали повышение урожая гороха. Однако существенным уровнем прибавки можно считать только то количество (0.51 г/сосуд), которое получено при использовании инокуляции на среднеокультуренной почве, что подчеркивает необходимость данного приема даже в условиях старопахотных участков. Внесение азотных удобрений повышало отзывчивость посевного гороха на ис-

Таблица 2. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на содержание N в растениях гороха, %

Вариант	Срок уборки (фаза развития)			
	ветвление стебля		бутонизация—начало цветения	
	1	2	1	2
N_0	1.40	1.82	2.31	2.31
$N_{0.05}$	1.97	2.48	2.76	2.49
$N_{0.10}$	2.22	2.55	2.94	2.61
$N_{0.15}$	2.30	2.70	3.03	2.76
$N_{0.20}$	2.40	2.87	3.57	3.30
$N_{0.25}$	2.48	2.92	3.60	3.46
HCP_{05}	0.19	0.40	0.43	0.63

пользование инокуляции в условиях средней окультуренности почвы до уровня 1.70–1.87 г/сосуд. Минимальный уровень зерновой продуктивности отмечен при внесении минерального азота в дозе 0.10 г/кг почвы. Последующее повышение доз до 0.20 г/кг почвы способствовало росту урожая гороха до 7.37 г/сосуд — без инокуляции и до 9.22 г/сосуд — при использовании инокуляции. Дальнейшее повышение дозы азота до 0.25 г/кг почвы приводило к повышению общей продуктивности растений в ущерб образованию урожая зерна. Таким образом, при использовании инокуляции посевного материала ризоторфином в условиях слабоокультуренной почвы максимально высокая урожайность гороха в опыте при уборке растений на зеленую массу и зерно была получена при внесении 0.25 г N/кг почвы. На среднеокультуренной почве максимальный урожай зеленой массы гороха получен также при внесении 0.25 г N/кг почвы, а при возделывании на зерно — 0.20 г N/кг почвы.

Отличительная особенность зернобобовых культур — высокое содержание азота и минеральных веществ в урожае. Влияние азотного удобрения и предпосевной обработки семян биопрепаратом Ризоторфин на содержание азота в зерне гороха представлено в табл. 4. С увеличением доз N-удобрения во всех фазах вегетации у гороха возрастало накопление биомассы, абсолютное содержание (концентрация) азота в ней и его накопление растениями. Эта тенденция сохранялась в фазе полной спелости зерна (соломы), а также подтверждалась величиной выноса азота биологическим урожаем. За счет использования Ризоторфина наблюдали увеличение накопления азота в зерне на 0.22% (слабоокультуренная почва) и на 0.18% (среднеокультуренная почва).

Таблица 3. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на урожайность зерна гороха, г/сосуд

Вариант	Дерново-подзолистая слабоокультуренная почва		Среднее	Дерново-подзолистая среднеокультуренная почва		Среднее
	без инокуляции	при инокуляции		без инокуляции	при инокуляции	
N ₀	5.9	7.2	6.5	6.60	8.26	7.43
N _{0.05}	6.7	7.9	7.3	7.01	8.77	7.89
N _{0.10}	4.3	5.4	4.9	6.63	8.30	7.47
N _{0.15}	4.7	5.9	5.3	7.06	8.85	7.96
N _{0.20}	5.2	7.2	6.2	7.37	9.22	8.30
N _{0.25}	6.4	8.3	7.3	6.76	8.46	7.61
Среднее	5.5	7.0		6.91	8.64	
HCP ₀₅	1.1			0.45		

Таблица 4. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на содержание N в зерне гороха, %

Вариант	Дерново-подзолистая слабоокультуренная почва		Среднее	Дерново-подзолистая среднеокультуренная почва		Среднее
	без инокуляции	при инокуляции		без инокуляции	при инокуляции	
N ₀	2.85	3.07	2.96	3.05	3.23	3.14
N _{0.05}	3.04	3.10	3.07	3.20	3.26	3.23
N _{0.10}	3.11	3.15	3.13	3.28	3.31	3.30
N _{0.15}	3.12	3.16	3.14	3.31	3.36	3.34
N _{0.20}	3.14	3.14	3.14	3.32	3.35	3.34
N _{0.25}	3.18	3.17	3.18	3.37	3.41	3.39
Среднее	3.07	3.13		3.26	3.32	
HCP ₀₅	0.18			0.15		

За счет инокуляции, как правило, происходило более интенсивное накопление азота в зерне и при внесении N-удобрения. По результатам исследований [16], показано, что за счет использования для инокуляции семян гороха Ризоторфина повышалась возможность использования азота в период налива зерна и при использовании возрастающих доз N-удобрения.

Использование удобрений и других агротехнических приемов должным образом отражалось на величине урожая не только основной, но и побочной продукции гороха (табл. 5). Выход сухой массы соломы в среднем в опыте составил 5.85–7.09 г/сосуд. За счет увеличения уровня окультуренности почвы урожайность соломы, учитывая всю совокупность данных, увеличилась на 0.90 г/сосуд или на 14.9%. Использование Ризоторфина также способствовало существенному увеличению урожайности соломы гороха. На сла-

боокультуренной почве прибавка составила 0.26 г/сосуд, на среднеокультуренной почве — 0.49 г/сосуд. На слабоокультуренной почве, на фоне использования азотного удобрения в дозах 0.05–0.20 г N/кг почвы урожайность соломы при инокуляции семян Ризоторфином увеличилась на 0.18–0.66 г/сосуд. На более окультуренной почве прибавки от инокуляции на фоне азотного удобрения составили 0.24–0.54 г/сосуд. Использование активных штаммов ризобий в составе Ризоторфина способствовало формированию симбиотического аппарата и активизации процесса N-фиксации. Это определенным образом отразилось на индуцировании ростовых процессов и нарастании вегетативной массы, сопровождаемое увеличением ассимиляционной поверхности растений. Применение N-удобрения также оказывало стимулирующее влияние на развитие и урожай соломы гороха. На дерново-подзолистой

Таблица 5. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на урожайность соломы гороха, г/сосуд

Вариант	Дерново-подзолистая слабоокультуренная почва		Среднее	Дерново-подзолистая среднеокультуренная почва		Среднее
	без инокуляции	при инокуляции		без инокуляции	при инокуляции	
N ₀	4.65	4.91	4.78	5.56	6.05	5.81
N _{0.05}	5.09	5.27	5.18	6.34	6.72	6.53
N _{0.10}	5.49	5.79	5.64	6.66	6.90	6.78
N _{0.15}	6.17	6.54	6.36	7.04	7.29	7.17
N _{0.20}	6.52	6.73	6.63	7.38	7.71	7.55
N _{0.25}	7.15	7.81	7.48	7.35	7.89	7.62
Среднее	5.85	6.76		6.72	7.09	
HCP ₀₅	0.23			0.34		

слабоокультуренной почве прибавки урожайности составили 0.44–2.50 г/сосуд. Использование инокуляции Ризоторфином усилило отдачу от N-удобрения до 0.36–2.90 г/сосуд. На почве среднего уровня окультуренности прибавки урожайности от N-удобрения составили 0.78–1.79 г/сосуд. За счет использования микробиального препарата Ризоторфин наблюдали снижение отзывчивости растений гороха на N-удобрение. На основании представленных результатов можно говорить о наблюдаемом синергическом эффекте от использования N-удобрения на фоне инокуляции Ризоторфином семян гороха перед посевом на слабоокультуренной дерново-подзолистой почве.

С ростом и развитием растений происходит изменение не только биометрических размеров, но и химического состава развивающихся органов. Снижение физиологической активности процессов по мере созревания сопровождалось уменьшением концентрации элементов питания. Вместе с этим общей характерной чертой для гороха было значительное накопление азота, фосфора, калия не только в зерне, но и в соломе. Результаты по влиянию азотного удобрения и предпосевной обработки семян Ризоторфином на элементный состав соломы гороха в фазе полной спелости семян представлены в табл. 6. Было установлено, что содержание азота в соломе варьировало от 1.13 до 1.58% на слабоокультуренной почве и от 1.37 до 1.72% на среднеокультуренной почве. Предпосевная инокуляция семян Ризоторфином не оказала существенного влияния на содержание азота в соломе. Хотя без внесения N-удобрения на слабо- и среднеокультуренной почве отмечена тенденция к увеличению накопления азота в урожае побочной продукции. Внесение

возрастающих доз N-удобрения отразилось неоднозначно на элементном составе урожая побочной продукции. Следует сказать о существенном увеличении накопления азота в соломе гороха на 0.48–0.59% в условиях среднеокультуренной почвы при внесении N_{0.15–0.20} без использования Ризоторфина. При применении бактериального препарата таких “непроизводительных” издержек азота отмечено не было. Применение Ризоторфина способствовало более интенсивному накоплению N-содержащих соединений в растениях гороха и их последующему более полному оттоку в созревающие семена.

Проведение исследования в условиях вегетационного опыта позволило провести оценку влияния рассмотренных приемов на развитие корневой системы гороха и выявить некоторые тенденции (табл. 7). Накопление массы сухого вещества корневых остатков в опыте наблюдали до момента полного созревания культуры. Более интенсивное развитие корневой системы гороха при других равных условиях отмечено на среднеокультуренной почве. Прежде всего это определялось интенсивностью развития растений и только потом количеством и доступностью элементов питания в почве. Инокуляция семян Ризоторфином способствовала увеличению выхода сухой массы корневых остатков гороха. На почве слабой степени окультуренности без внесения N-удобрения прибавка массы корневых остатков гороха составила 16.1%. При использовании азотного удобрения N_{0.05–0.15} прибавка от инокуляции сохранялась на уровне 19.4–25.3%. Последующее увеличение доз до N_{0.20–0.25} привело к сокращению прибавки до 4.4–8.8%. На среднеокультуренной почве без внесения N-удобрения

Таблица 6. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на содержание N в соломе гороха, %

Вариант	Дерново-подзолистая слабоокультуренная почва		Среднее	Дерново-подзолистая среднеокультуренная почва		Среднее
	без инокуляции	при инокуляции		без инокуляции	при инокуляции	
N ₀	1.13	1.29	1.21	1.37	1.44	1.41
N _{0.05}	1.31	1.37	1.34	1.45	1.56	1.51
N _{0.10}	1.47	1.42	1.45	1.51	1.54	1.53
N _{0.15}	1.49	1.55	1.52	1.62	1.55	1.59
N _{0.20}	1.58	1.57	1.58	1.61	1.44	1.53
N _{0.25}	1.57	1.52	1.55	1.72	1.41	1.57
Среднее	1.43	1.45		1.55	1.49	
HCP ₀₅	0.17			0.13		

прибавка от использования бактериального препарата была существенно меньше — 8.3%. В этих условиях внесение N-удобрения не обеспечивало более интенсивного развития корневой системы гороха даже за счет использования инокуляции, а при более высокой дозе (N_{0.25}) даже ограничивало ее развитие. При внесении в почву азотного удобрения у гороха наблюдали усиление ростовых процессов. Эти изменения фиксировали по морфобиометрическим параметрам не только надземной части растений, но и корневых систем. За счет совместного использования N-удобрения с Ризоторфином, наблюдали более активное формирование вторичной корневой системы и увеличение массы корневых остатков гороха. Прибавки в выходе сухой массы корневых систем в фазе ветвления стебля от использования азотного удобрения на слабоокультуренной почве составили 0.67–2.40 г/сосуд, на среднеокультуренной — 0.75–2.72 г/сосуд. Отмеченную тенденцию наблюдали и в последующих фазах развития гороха. В фазе бутонизации—начала цветения прибавки массы корневых систем растений в соответствии с окультуренностью почвы составили 0.82–1.51 и 0.89–1.70 г/сосуд соответственно. Максимальные прибавки в опыте (3.59 и 3.29 г/сосуд) в фазе полной спелости зерна были отмечены на слабо- и среднеокультуренной почве от внесения N_{0.25}.

По мере созревания урожая и замедления развития растений гороха наблюдалось и снижение содержания N, P₂O₅, K₂O в вегетативных органах растений. Особенно резко снизилось содержание азота, калия и меньше — фосфора. Та же тенденция была отмечена для элементного состава корневой системы гороха (табл. 8). В фазе ветвления стебля содержание азота в корневой системе на

слабоокультуренной почве изменялось от 1.58 до 2.40%, на среднеокультуренной — от 1.67 до 2.45%. Наименьшее накопление азота в биомассе корней (1.58 и 1.67%) отмечено без применения N-удобрения. Более высокое накопление азота на слабоокультуренной почве было зафиксировано при внесении 0.10 г N/кг почвы, на среднеокультуренной почве — 0.25 г N/кг. С появлением аттрагирующих центров в растениях, которыми к фазе бутонизации—начала цветения являются клубеньки на корневой системе гороха, а к моменту созревания — семена, наблюдали выраженный отток питательных веществ. Накопление азота с учетом окультуренности почвы снизилось на 0.46–0.80% (слабоокультуренная) и на 0.40–1.06% (среднеокультуренная почва). К моменту созревания гороха нисходящий тренд накопления азота в составе корневой системы сохранился. Более отчетливо это прослежено без инокуляции семян Ризоторфином. Влияние Ризоторфина на содержание N в корневой системе гороха было следующим. При бактеризации наблюдали накопление азота в корнях при созревании зерна. Это указывает на более высокую активность и сохранение функционирования корневой системы, что положительно сказалось на поступлении и накоплении азота в формирующихся зернах. Сохранность активного физиологического состояния корневой системы находилось в тесной координации с работой фотосинтетического аппарата бобовых культур, от действия которого зависит не только поток ассимилятов к плодам, но и возможности симбиотрофного питания азотом. Использование N-удобрения стимулировало развитие корневой системы, накопление в ее составе азота: в фазе ветвления стебля — на 0.18–0.82%,

Таблица 7. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на количество корневых остатков гороха, г/сосуд

Вариант	Срок уборки (фаза развития)							
	ветвление стебля		бутонизация—начало цветения		полная спелость			
	при инокуляции				без инокуляции		при инокуляции	
	1	2	1	2	1	2	1	2
N ₀	2.33	2.67	3.96	4.48	4.2	5.3	4.83	5.76
N _{0.05}	3.00	3.42	4.78	5.37	5.2	7.6	5.36	7.89
N _{0.10}	3.73	4.24	4.87	5.52	5.6	7.7	6.71	8.09
N _{0.15}	3.91	4.47	5.33	6.01	5.8	7.9	7.23	8.64
N _{0.20}	4.48	5.11	5.47	6.18	7.5	8.3	7.83	8.93
N _{0.25}	4.73	5.39	5.40	6.07	7.7	8.9	8.42	9.05
Среднее	3.70	4.22	4.97	5.61	6.0	7.6	6.73	8.06
HCP ₀₅	0.40		0.53		1.1		0.86	

бутонизации—начало цветения — на 0.02—0.51%, полной спелости — на 0.05—0.07% в среднем в опыте. Однако зачастую эта тенденция сменялась снижением накопления азота в корнях при превышении условного порога доз N-удобрения. Наибольшее содержание азота в корневых остатках гороха посевного в опыте (2.05—2.07%), независимо от доз азотного удобрения и инокуляции Ризоторфином, наблюдали в фазе ветвления стебля, что совпадало с наиболее активным периодом процесса формирования симбиотического аппарата. По мнению [17], содержание азота в бобово-ризобийном комплексе может оставаться на низком уровне в результате быстрого переноса азотсодержащих веществ из бактериоида в ткани растения, даже несмотря на высокую азотфиксирующую активность. Благодаря этому в системе поддерживается высокая активность нитрогеназы, что обеспечивает экологическую целесообразность взаимодействия организмов. Существенных различий по содержанию азота в составе корневых остатков в зависимости от уровня окультуренности дерново-мелкоподзолистой почвы и использованных доз азота в опыте не было отмечено.

По развитию хозяйственно ценной надземной массы растений гороха и ее соотношения с пожнивными и корневыми остатками можно судить о сбалансированности минерального питания растений, эффективности расходования основных элементов в процессе их выращивания (табл. 9). Соотношение между надземной вегетативной массой растений и корневой системой имело возрастающий тренд на почве слабой и средней степени окультуренности. Варьирование этого пока-

зателя на слабоокультуренной почве в фазе ветвления стебля составило 1.2 ед. против 1.5 ед. на среднеокультуренной почве. К фазе бутонизации—начала цветения отмечали рост соотношения и увеличение варьирования признака. На слабоокультуренной почве диапазон соотношения составил 11.0—12.5 против 11.7—14.5 на среднеокультуренной почве. Выраженной зависимости между дозами азота и соотношением “надземная масса: поживно-корневые остатки” в фазах развития не было отмечено. Исключением можно считать тенденцию к увеличению рассмотренного соотношения при внесении N-удобрения на среднеокультуренной почве в фазе бутонизации—начала цветения.

Использование N-удобрения и бактериального препарата Ризоторфин приводило к изменению направленности ростовых процессов и распределения пластических веществ к моменту созревания культуры (табл. 10). В случае уборки гороха на зерно, соотношение основной и побочной продукции становилось еще более тесным. Зависело это от количества формируемого зерна на растениях и нарастания вегетативной массы, развития корневой системы. На все эти параметры однозначно влияло использование азотного и бактериального удобрений. Следует заметить, что более широкое соотношение между зерном и соломой (1.11—1.50), а также между зерном и суммарным количеством побочной продукции (0.60—0.70), получено без внесения N-удобрения или при использовании минимальной дозы (N_{0.05}) в опыте. Наблюдаемое снижение этого соотношения при внесении N-удобрения означало

Таблица 8. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на содержание N в корневых остатках гороха, %

Вариант	Срок уборки (фаза развития)							
	ветвление стебля		бутонизация—начало цветения		полная спелость			
	при инокуляции				без инокуляции		при инокуляции	
	1	2	1	2	1	2	1	2
N ₀	1.58	1.67	1.12	1.27	0.97	1.09	1.11	1.15
N _{0.05}	2.18	1.85	1.45	1.29	1.13	1.10	1.30	1.10
N _{0.10}	2.40	2.06	1.60	1.32	1.20	0.99	1.45	1.24
N _{0.15}	2.34	2.21	1.63	1.38	1.28	1.01	1.21	1.17
N _{0.20}	1.99	2.18	1.56	1.35	1.14	0.89	1.19	1.12
N _{0.25}	1.81	2.45	1.21	1.39	0.95	1.12	1.13	1.05
HCP ₀₅	0.33		0.18		0.17		0.12	

Таблица 9. Соотношение вегетативных частей растений гороха “надземная масса ПКО” в разных фазах вегетации

Вариант	Ветвление стебля		Бутионизация—начало цветения	
	1	2	1	2
N ₀	7.2	9.4	12.5	11.7
N _{0.05}	7.0	10.4	11.0	13.0
N _{0.10}	5.7	9.4	12.0	13.3
N _{0.15}	7.2	9.9	11.2	13.1
N _{0.20}	7.8	8.9	11.9	13.6
N _{0.25}	8.2	9.9	12.2	14.5
Среднее	7.2	9.6	11.8	13.2

более существенное увеличение зерновой продуктивности растений наряду с отмеченным ростом выхода соломы и пожнивно-корневых остатков. На основании средних показателей можно констатировать, что при обработке посевного материала гороха препаратом Ризоторфин наблюдали увеличение соотношения между зерном и соломой на слабо- и среднеокультуренной почве. Сорта с пониженным отношением соломы к зерну, низким стеблем и крупным озерненным колосом, с мощной корневой системой, скоро-спелые, устойчивые к полеганию и засухе, и иммунные к болезням и вредителям, в большей степени отвечают рациональному использованию минеральных удобрений [18]. Для более полной реализации этих возможностей нужно повсеместно применять сортовую агротехнику как обязательный элемент системы земледелия.

По утверждению [19], “...система применения азотных удобрений в агроландшафтах должна

быть дифференцированной и адаптированной к разным типам земель, обеспечивая минимальные потери азота и эффективное его использование”. Эти требования к применению N-удобрений при возделывании зернобобовых культур могут быть реализованы при детальной оценке выноса N и его баланса с учетом биологического и сортового потенциала культур, термогидрологических особенностей территории и степени окультуренности почв [20]. Анализ содержания азота в отдельных частях растений посевного гороха и динамики формирования надземной биомассы в онтогенезе показал, что основная часть N потребляется культурой в период от всходов до фазы бутонизации—начала цветения (табл. 11). Внесение N-удобрения способствовало существенному увеличению выноса азота надземной биомассой гороха посевного. Применение N_{0.05–0.25} перед посевом гороха на слабоокультуренной почве повысило величину потребления N растениями в фазе

Таблица 10. Соотношение основной и побочной продукции в фазе полной спелости зерна гороха

Вариант	Зерно : солома				Зерно : (солома + ПКО)			
	без инокуляции		при инокуляции		без инокуляции		при инокуляции	
	1	2	1	2	1	2	1	2
N ₀	1.26	1.46	1.19	1.37	0.67	0.70	0.64	0.70
N _{0.05}	1.31	1.50	1.11	1.31	0.65	0.62	0.60	0.60
N _{0.10}	0.78	0.94	1.00	1.20	0.39	0.40	0.50	0.55
N _{0.15}	0.76	0.90	1.00	1.21	0.39	0.41	0.49	0.56
N _{0.20}	0.80	1.07	1.00	1.20	0.37	0.48	0.48	0.55
N _{0.25}	0.89	1.06	0.92	1.07	0.43	0.50	0.43	0.50
Среднее	0.97	1.16	1.03	1.23	0.48	0.52	0.52	0.58

стеблевания в 1.8–4.1 раза, на среднеокультуренной почве – в 1.9–3.4 раза. Благодаря этому коэффициент хозяйственного использования азота ($K_{\text{хоз}}$) соответственно увеличился на 0.03–0.13 и 0.03–0.06 ед. Последующее развитие гороха с учетом использования для предпосевной инокуляции семян биопрепарата Ризоторфин сопровождалось интенсивным потреблением N растениями. При внесении N_{0.20–0.25} на слабоокультуренной почве вынос азота суммарно превысил 500 мг N/сосуд. На среднеокультуренной почве потребление N растениями в фазе бутонизации–начала цветения было еще более активным. Более четко это прослежено для формирующейся надземной зеленой массы при внесении N-удобрения. В соответствии с этим происходило увеличение коэффициента полезного использования N до 0.83–0.88. При наступлении фазы формирования бобов происходило резкое изменение направленности физиолого-биохимических процессов во всех органах растений. Наиболее сильными аттрагирующими центрами становились семена. Большая часть симбиотически усвоенного азота и других питательных веществ зернобобовые культуры направляли на их формирование. К моменту полного созревания зерна наблюдали снижение интенсивности потребления азота растениями (табл. 12). Вынос азота зерном в большинстве вариантов превосходил его накопление в соломе и пожнивно-корневых остатках гороха. Наиболее четко это отмечено в контроле (N₀) и при внесении N_{0.05}. Использование биопрепарата Ризоторфин оказало влияние на накопление и распределение потребленного азота между основной и побочной продукцией. При инокуляции семян гороха в зерне было дополнительно аккумулировано 38.0–65.5 мг N/сосуд. Аналогичную тенденцию отметили для соломы и ПКО, вынос N увели-

чился на 3.7–31.4 мг/сосуд. Независимо от степени окультуренности почвы отмечали увеличение индекса $K_{\text{хоз}}$ для выноса N биологическим урожаем во всем рассмотренном диапазоне доз N-удобрения. В работе [8] показано, что при использовании биопрепаратов на слабо- и высокоплодородной почвах происходило увеличение доли азота удобрения в зерне от общего его накопления в растениях и снижалось его количество в побочной продукции и корнях. Коэффициенты хозяйственного использования N достаточно тесно коррелировали ($r = 0.56–0.99$) с соответствующими показателями, отражающими соотношение зерно : (солома + ПКО). Это указывало на то, что биологический вынос N горохом на 66.1–98.2% на слабоокультуренной и на 31.0–82.4% на среднеокультуренной дерново-подзолистой почве определялся продуктивностью растений. Различия в объемах потребленного и накопленного N отдельными органами растений в соответствии со степенью окультуренности почвы не были существенными и имели различную тенденцию. ПКО и солома гороха являются основной составляющей в объеме поступления свежего органического вещества в почву, которое после минерализации выступает не только источником элементов питания, но и субстратом для питания почвенных микроорганизмов, активатором симбиотической азотфиксации для ризобий, основой для продуцирования и эмиссии C-CO₂ и N-N₂O. Даже клубеньки, поступающие в почву в течение периода вегетации гороха, независимо от их активности, влияют на микробоценоз почвы, что выражается увеличением накопления минеральных форм N и микробной биомассы [21]. Величина относительного участия N почвы и удобрений в выносе этого элемента урожаем возделываемых культур существенно зависит от ряда условий. Принято считать, что чем выше окультуренность

Таблица 11. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на вынос N зеленой массой и ПКО гороха. мг/сосуд

Вариант	Срок уборки (фаза развития)					
	ветвление стебля			бутонизация—начало цветения		
	зеленой массой	ПКО	$K_{\text{хоз}}$	зеленой массой	ПКО	$K_{\text{хоз}}$
Слабооккультуренная почва						
N_0	58.5	36.8	0.61	228	44.4	0.84
$N_{0.05}$	103	65.4	0.61	292	69.3	0.81
$N_{0.10}$	117	89.5	0.57	345	77.9	0.82
$N_{0.15}$	163	91.5	0.64	362	86.9	0.81
$N_{0.20}$	209	89.2	0.70	465	85.3	0.84
$N_{0.25}$	241	85.6	0.74	473	65.3	0.88
Среднее	149	76.3	0.65	361	71.5	0.83
Среднеоккультуренная почва						
N_0	114	44.6	0.72	242	56.9	0.81
$N_{0.05}$	220	63.3	0.78	347	69.3	0.83
$N_{0.10}$	255	87.3	0.74	383	72.9	0.84
$N_{0.15}$	298	98.8	0.75	435	82.9	0.84
$N_{0.20}$	327	111	0.75	554	83.4	0.87
$N_{0.25}$	391	132	0.75	608	84.4	0.88
Среднее	267	89.6	0.75	428	75.0	0.85

почвы, тем меньше доля участия азота соответствующих удобрений в общем выносе N урожаем [22]. В условиях разной степени окультуренности и эродированности почвы доля почвенных запасов N в структуре выноса элемента урожаем обычно больше, чем из удобрений, и может достигать 84–85% [23].

Азотфиксация является важным условием в жизнеобеспечении зернобобовых культур. Условия прохождения этого процесса отражаются на урожайности и элементном составе растений. В исследовании [15] азотфиксация клевера первого года жизни повышалась на 6.8% по сравнению с фоном при внесении 30 кг N/га на слабооккультуренной почве, тогда как на хорошооккультуренной — снижалась на 12.2%. При внесении 60 кг N/га азотфиксация в 1-й год жизни на слабооккультуренной почве снижалась на 21.9, во 2-й год — на 21.0%. Сильнее ингибировалась азотфиксация во 2-й год жизни (30.6%) на хорошооккультуренной почве. Повышение плодородия дерново-подзолистой почвы приводило к снижению азотфиксации и использования азота атмосферы на 2.5–16.9% в абсолютных показателях при внесении N-удобрения.

Азотфиксирующая способность зернобобовых культур во многом зависит от сохранения численности и активности клубеньковых бактерий. Использование биопрепаратов на основе штаммов азотфиксирующих бактерий [24–29] называется одним из наиболее значимых условий, которое влияет на формирование и эффективность функционирования симбиотического аппарата гороха. Поэтому их использование для инфицирования корневых систем растений гороха афильных сортов является обязательным приемом современных агротехнологий [30, 31]. Вместе с тем известно, что и азотные соединения влияют на симбиотический аппарат бобовых на всех этапах его формирования. Действие проявляется на функционировании самого механизма симбиоза, начиная с образования микробного пула ризосферы и клубеньков и заканчивая процессом активной азотфиксации [32–34]. Наиболее приемлемыми параметрами для рассмотрения и последующей оценки влияния изученных факторов на развитие симбиотического аппарата, является общее количество активных коневых вздутий (клубеньков) и их суммарная масса в пересчете на 1 растение (табл. 13). На дерново-мелкоподзолистой слабооккультуренной почве формирование симбиотического аппарата в фазе ветвления стебля отмече-

Таблица 12. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на вынос N зерном, соломой и ПКО гороха, мг/сосуд

Вариант	Без инокуляции				При инокуляции			
	зерном	соломой	ПКО	$K_{\text{хоз}}$	зерном	соломой	ПКО	$K_{\text{хоз}}$
Слабооккультуренная почва								
N_0	167	52.5	40.4	0.64	220	63.3	53.6	0.65
$N_{0.05}$	203	66.7	59.1	0.62	246	72.2	69.7	0.63
$N_{0.10}$	133	80.7	67.4	0.47	171	82.2	97.3	0.49
$N_{0.15}$	146	91.9	73.9	0.47	187	101	87.5	0.50
$N_{0.20}$	164	103	85.5	0.46	226	106	93.2	0.53
$N_{0.25}$	202	112	73.5	0.52	264	119	95.1	0.55
Среднее	169	84.5	66.6	0.53	219	90.6	82.7	0.56
Среднеоккультуренная почва								
N_0	201	76.2	58.0	0.60	267	87.1	66.2	0.63
$N_{0.05}$	224	91.9	83.1	0.56	286	105	86.8	0.60
$N_{0.10}$	218	101	76.4	0.55	275	106	100	0.57
$N_{0.15}$	234	114	79.8	0.55	297	113	101	0.58
$N_{0.20}$	245	119	73.5	0.56	309	111	100	0.59
$N_{0.25}$	228	126	100	0.50	289	111	95.0	0.58
Среднее	225	105	78.5	0.55	287	106	91.6	0.59

но только в случае отсутствия дополнительного внесения минерального азота. В условиях среднеоккультуренной почвы формирование симбиотического аппарата при внесении минерального азота происходило более активно, увеличивалось общее количество клубеньков и их масса. Показатели масса и количество клубеньков независимо от степени окультуренности почвы достигали максимума в фазе бутонизации—начала цветения. К моменту появления на растениях бобов, выполняющих роль более сильных аттрагирующих центров для накопления питательных веществ, количество и масса клубеньков значительно уменьшались или исчезали вовсе. Наблюдался ограниченный отток питательных веществ к корням растений, что приводило к прекращению их активного функционирования и последующему отмиранию. Наряду с использованием инокуляции и азотного удобрения, главным эдафическим фактором, ограничивающим активность симбиоза бобовых культур и азотфиксирующих почвенных микроорганизмов, в том числе на территории Пермского края, является повышенная кислотность почвы [35]. Этот показатель особенно важен для сохранения численности пула ризобий в период между посевами зернобобовых культур. Для почв с $\text{pH} < 5.0$ численность *R. leguminosarum* bv. *viciae* не превышала 3.0×10^2 КОЕ/г почвы,

быстро снижалась в отсутствие бобового растения-хозяина и практически исчезала по прошествии 3 лет [36]. В этих условиях будет проявляться высокая эффективность применения инокуляции. Вместе с тем в кислых почвах уменьшается поглотительная способность корневой системы, увеличивается опробкование внешних тканей перидермы, что существенно осложняет образование корневых волосков и их последующее инфицирование. По мнению [37, 38], в кислой почве клубеньковые бактерии снижают свою вирулентность и активность, существенно уменьшается их выживаемость и интенсивность инфицирования корневых волосков [39]. При этом степень влияния кислотности почвы изменяется в зависимости от штаммовой разновидности ризобий. По результатам наших исследований, отмечено снижение массы и количества клубеньков в сильноокислой слабооккультуренной почве по сравнению со слабоокислой более окультуренной почвенной разностью. Этот фактор с высокой долей вероятности привел к получению более низкого урожая на слабооккультуренной почве во все сроки уборки (табл. 1, 3).

Следует также отметить разную отзывчивость растений гороха в условиях разной окультуренности почвы на дозы минерального азота. На слабооккультуренной почве, формирование симбиоти-

Таблица 13. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на динамику формирования симбиотического аппарата на корневой системе гороха

Степень окультуренности почвы	Доза азота	Срок уборки (фаза развития)					
		ветвление стебля		бутонизация—начало цветения		зеленые (плоские) бобы	
		шт.	мг	шт.	мг	шт.	мг
Дерново-подзолистая слабо-окультуренная	N ₀	8	34	15	203	4	14
	N _{0.05}	—	—	43	125	5	18
	N _{0.10}	—	—	4	11	—	—
Дерново-подзолистая средне-окультуренная	N ₀	32	154	36	746	—	—
	N _{0.05}	11	108	21	594	3	27
	N _{0.10}	13	103	68	382	5	76

ческого аппарата не происходило должным образом с увеличением дозы азота >0.05 г/кг почвы. На среднеокультуренной почве данный уровень превышен в 4 раза (0.20 г/кг). Применение более высоких доз азота полностью подавляет процесс формирования симбиотического аппарата на корневой системе гороха. Происходит переход растений на автотрофное потребление азота почвы и последующее его накопление в составе вегетативной массы и зерна. Единовременное внесение более высоких доз азотного удобрения оказывает угнетающее действие на развитие симбиотического аппарата, формирующегося на корневой системе, что в последующем отражается на продолжительности активного функционирования ассимилирующей поверхности растений гороха посевного в условиях слабо- и среднеокультуренной почвы.

Фиксация атмосферного азота клубеньковыми бактериями в симбиозе с бобовыми культурами начинается примерно на 15–20-е сут после появления всходов, но в начале вегетационного периода N из атмосферы потребляется медленно [40]. Продолжается этот процесс до созревания семян и последующего старения растений, а заметная его активность отмечена в фазе бутонизации—начала цветения. Об этом косвенно можно судить по морфо-биометрическим параметрам самих клубеньков и их элементному составу (табл. 14). Согласно полученным результатам, можно отметить, что наибольшее накопление азота в клубеньках гороха наблюдали в фазе бутонизации—начала цветения. В условиях слабоокультуренной почвы содержание азота варьировало от 4.35 до 4.91%. На более окультуренной почвенной разности накопление азота было больше на 19.3–36.3%. За счет использования азотного удобрения в условиях среднеокультуренной

почвы отмечена тенденция к увеличению накопления азота в составе клубеньков. Это могло свидетельствовать о высокой активности происходящих физиологических процессов, связанных с усвоением атмосферного азота, а также включении механизма со стороны макросимбионта, который ограничивает последующее усвоение азота биологическим путем. Последующее развитие растений гороха и его симбиотического аппарата сопровождалось снижением накопления азота в клубеньках на 47.5–64.4 и 50.6–72.4% соответственно.

ВЫВОДЫ

1. Дифференциация содержания минерального азота при изначальном близком уровне содержания N_{мин} в слабо- и среднеокультуренной дерново-подзолистой почве зафиксирована к моменту наступления у гороха фазы ветвления стебля. Сильная положительная корреляционная зависимость ($r = 0.79–0.86$) между дозами Nудобрения и содержанием N_{мин} в почве установлена только в фазе полной спелости семян. Применение для инокуляции семян гороха бактериального препарата Ризоторфин способствовало индукции симбиотической активности ризобий. В результате этого горох менее активно использовал запасы подвижных форм минерального азота в почве.

2. При уборке гороха на зеленую массу, продуктивность растений на среднеокультуренной почве в фазе ветвления стебля была больше, чем на слабоокультуренной почве в 1.1–1.3 раза, в фазе бутонизации—начала цветения – в 1.3–1.9 раза. Урожайность зеленой массы при этом составила 2.1–53.5 и 52.4–87.9 г/сосуд соответственно. С повышением дозы N-удобрения с N_{0.05} до N_{0.25}

Таблица 14. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян препаратом Ризоторфин на содержание N в клубеньках в фазах развития растений гороха, %

Степень окультуренности почвы	Доза азота	Фазы уборки		
		ветвление стебля	бутонизация—начало цветения	зеленые (плоские) бобы
Дерново-подзолистая слабоокультуренная	N ₀	2.35	4.41	1.57
	N _{0.05}	—	4.91	2.58
	N _{0.10}	—	4.35	—
Дерново-подзолистая среднеокультуренная	N ₀	2.73	5.32	—
	N _{0.05}	3.24	5.86	1.62
	N _{0.10}	3.38	5.93	2.93

наблюдали увеличение урожая зеленой массы гороха в соответствии со степенью окультуренности почвы на 3.4–22.2 и 10.3–35.5 г/сосуд.

3. Накопление N в вегетативной массе гороха определяла степень окультуренности почвы. При учете в фазе бутонизации—начала цветения более высокое содержание N (2.76–3.60%) отмечено на слабоокультуренной почве, что обусловлено большей отзывчивостью растений на внесение возрастающих доз N-удобрения на менее плодородной дерново-подзолистой почве.

4. Урожайность зерна гороха на среднеокультуренной почве была в 1.24–1.25 раза больше (6.91–8.64 г/сосуд), чем на слабоокультуренной почве. Прибавка урожая от использования Ризоторфина в среднем в опыте составила 1.31 г/сосуд на слабо- и 1.66 г/сосуд — на среднеокультуренной почве. Внесение N-удобрения в условиях среднеокультуренной почвы повышало отзывчивость посевного гороха на использование инокуляции Ризоторфином до 1.70–1.87 г/сосуд. За счет использования Ризоторфина и внесения N-удобрения наблюдали увеличение накопления N в зерне гороха на 0.22% (слабоокультуренная почва) и на 0.18% (среднеокультуренная почва).

5. Использование Ризоторфина способствовало увеличению выхода соломы гороха от 0.26 г/сосуд (слабоокультуренная почва) до 0.49 г/сосуд (среднеокультуренная почва) и снижению накопления в ее составе N на 0.48–0.59%. Применение Ризоторфина также было эффективным — выход соломы не зависимо от окультуренности почвы увеличился на 0.44–2.50 г/сосуд.

6. Более интенсивное развитие корневой системы гороха наблюдали на среднеокультуренной почве. Обработка семян гороха Ризоторфином способствовала увеличению выхода ПКО на 16.1–25.3% на слабоокультуренной почве, прибавка на среднеокультуренной почве составляла всего 8.3%. В этих условиях внесение N-удобре-

ния не обеспечивало более интенсивного развития корневой системы гороха, а при более высокой дозе (N_{0.25}) даже ограничивало ее развитие. При бактеризации семян Ризоторфином наблюдали накопление N в корнях. Это указывало на более высокую активность и сохранение функционирования корневой системы, что положительно сказалось на поступлении и накоплении N в формирующемся зерне.

7. Внесение N-удобрения способствовало существенному увеличению выноса азота с надземной биомассой гороха в фазе стеблевания на слабо- (в 1.8–4.1 раза) и среднеокультуренной почве (в 1.9–3.4 раза). В фазе бутонизации—начала цветения потребление N растениями гороха было еще более активным, K_{хоз} увеличился до 0.83–0.88. Использование биопрепарата Ризоторфин оказало влияние на накопление и распределение потребленного N между основной и побочной продукцией растений. Благодаря этому в зерне гороха было дополнительно аккумулировано 38.0–65.5 мг N/сосуд.

8. Формирование симбиотического аппарата на корневой системе гороха в фазе ветвления стебля на слабоокультуренной почве отмечено только в случае отсутствия дополнительного внесения N-удобрения. В условиях среднеокультуренной почвы формирование симбиотического аппарата при внесении N-удобрения происходило более активно — увеличивалось общее количество клубеньков и их масса. С увеличением дозы N-удобрения >0.05 г/кг на слабо- и >0.20 г/кг — на среднеокультуренной почве процесс формирования симбиотического аппарата на корневой системе гороха полностью подавлялся. Происходил переход растений гороха на автотрофное потребление азота почвы и связанное с ним последующее накопление N в составе вегетативной массы и зерна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завалин А.А. Применение биопрепаратов при возделывании полевых культур // Достиж. науки и техн. АПК. 2011. № 8. С. 9–11.
2. Новикова Н.Е. Физиологическое обоснование листовой подкормки для оптимизации питания зерновых бобовых культур в онтогенезе растений (обзор) // Зернобоб. и круп. культуры. 2018. № 1 (25). С. 60–67.
3. Otieno P.E., Muthomi J.W., Chemining'wa G.N., Nderitu J.H. Effect of rhizobia inoculation, farm yard manure and nitrogen fertilizer on nodulation and yield of food grain legumes // J. Biol. Sci. 2009. V. 9. P. 326–332.
<https://doi.org/10.3923/jbs.2009.326.332>
4. Дозоров А.В. Роль симбиотического азота в решении белковой проблемы // Международ. сел.-хоз. журн. 2000. № 2. С. 58–59.
5. Alves B.J.R., Boddey R.M., Urqiaga S. The success of BNP in soybean in Brazil // Plant. Soil. 2003. № 252. P. 1–9.
6. Russell M.P., Birr A.S. Large-scale assessment of symbiotic dinitrogen fixation by crops: soybean and alfalfa in the Mississippi River basin // Agron. J. 2004. № 96. P. 1754–1760.
7. Елисеев С.Л. Пути увеличения производства зернобобовых культур в Предуралье // Перм. аграрн. вестн. 2014. № 3 (7). С. 11–18.
8. Тихонович И.А., Завалин А.А., Благовещенская Г.Г., Кожмяков А.П. Использование биопрепаратов – дополнительный источник элементов питания растений // Плодородие. 2011. № 3. С. 9–11.
9. Шафран С.А. Проблема азота в земледелии России и ее решение // Сборник статей (к 100-летию со дня рожд. Т.Н. Кулаковской) “Плодородие почв России: состояние и возможности”. М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2019. С. 32–39.
10. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. 1. М.: ВИУА, 1975. 163 с.
11. Посыпанов Г.С. Методы изучения биологической фиксации азота воздуха. М.: Агропромиздат, 1991. С. 300.
12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. М.: ИД Альянс, 2011. С. 352.
13. Белоусова Е.Н. Влияние многолетних трав и пара на структурный состав и мобилизацию минеральных форм азота чернозема Красноярской лесостепи // Вестн. Томск. ГУ. Биология. 2014. № 1 (25). С. 7–25.
14. Oldroyd G.E., Dixon R.D. Biotechnological solutions to the nitrogen problem // Curr. Opin. Biotechnol. 2014. V. 26. P. 19–24.
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.08.006>
15. Трепачев Е.П. Агрохимические аспекты биологического азота в современном земледелии. М.: Агроконсалт, 1999. С. 532.
16. Завалин А.А., Пасынков А.В. Азотное питание и прогноз качества зерновых культур. М.: ВНИИА, 2007. С. 208.
17. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Экология азотфиксации. М.: РАН, 2019. С. 252.
18. Мерзликин А.С., Абрамкина Л.П. Эффективность минеральных удобрений на сортах зерновых культур интенсивного типа селекции // Агрохим. вестн. 2011. № 5. С. 12–14.
19. Цыбулько Н.Н., Пунченко С.С., Жукова И.И. Потребление растениями и баланс азота на дерново-подзолистых почвах разной эродированности при возделывании ярового рапса // Весці БДПУ. Сер. 3. 2017. № 3. С. 5–15.
20. Семенов В.М. Слагаемые эффективности азотных удобрений в системе почва–растение и критерии их количественной оценки // Агрохимия. 1999. № 5. С. 25–32.
21. Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р. Метод оценки азотфиксирующей способности бобовых растений на основе симбиотических мутантов // Международ. сел.-хоз. журн. 2016. № 2. С. 49–51.
22. Bowen G.D., Zapata F. Efficiency in uptake and use of nitrogen by plants // Stable isotopes in plant nutrition, soil fertility and environmental studies. Vienna: IAE, 1991. P. 349–362.
23. Цыбулько Н.Н., Киселева Д.В., Жукова И.И. Использование зерновыми культурами азота почвы и удобрений // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. 2008. № 2. С. 36–41.
24. Brkić S., Milaković Z., Kristek A., Antunović M. Pea yield and its quality depending on inoculation, nitrogen and molybdenum fertilization // Plant Soil Environ. 2004. V. 50. P. 39–45.
<https://doi.org/10.17221/3640-PSE>
25. Geneva M., Zehirov G., Djonova E. The effect of inoculation of pea plants with mycorrhizal fungi and Rhizobium on nitrogen and phosphorus assimilation // Plant Soil Environ. 2006. V. 52. P. 435–440.
<https://doi.org/10.17221/3463-PSE>
26. Mfilinge A., Mtei, K., Ndakidemi P. Effect of rhizobium inoculation and supplementation with phosphorus and potassium on growth and total leaf chlorophyll content of bush bean *Phaseolus vulgaris* L. // Agricult. Sci. 2014. V. 05. № 14. P. 1413–1426.
<https://doi.org/10.4236/as.2014.514152>
27. Baba Z.M., Asif T., Sheikh F. [et al.] Studies on soil health and plant growth promoting potential of rhizobium isolates // Emirat. J. Food Agricult. 2015. V. 27. № 5. P. 423–429.
<https://doi.org/10.9755/ejfa.2015.04.043>
28. Habete A., Buraka T. Effect of rhizobium inoculation and nitrogen fertilization on nodulation and yield response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) at Bolo Sore, Southern Ethiopia // J. Biol. Agricult. Healthcare. 2016. № 6 (13). P. 72–75.
29. Алешин М.А., Михайлова Л.А. Влияние степени окультуренности дерново-подзолистой почвы на отзывчивость посевного гороха к уровню азотного питания // Аграрн. вестн. Верхневолжья. 2020. № 1 (30). С. 48–54.
30. Кузмичева Ю.В. Энергосберегающие приемы повышения продуктивности сортов гороха посевного (*Pisum sativum* L.) на основе растительно-мик-

- робных взаимодействий: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Орел, 2011. С. 22.
31. Кондыков И.В., Уваров В.Н., Зеленов А.Н., Кондыков Н.Н. Сорты гороха нового поколения, контрастные по архитектонике листового аппарата // Земледелие. 2012. № 5. С. 34–35.
 32. Агафонов Е.В., Стукалов М.Ю., Агафонова Л.Н. Влияние минеральных и бактериальных удобрений на урожайность гороха на черноземе обыкновенном // Агрохимия. 2001. № 8. С. 42–46.
 33. Гурьев Г.П. Некоторые аспекты формирования симбиотического аппарата у гороха // Зернобоб. и круп. культуры, 2014. № 1 (9). С. 11–16.
 34. Телекало Н.В. Влияние инокуляции и внекорневых подкормок на урожайность сортов гороха // Зернобоб. и круп. культуры. 2014. № 1 (9). С. 16–22.
 35. Evans J. An evaluation of potential rhizobium inoculant strains used for pulse production in acidic soils of south-east Australia // Aust. J. Exp. Agric. 2005. V. 45. P. 257–268.
 36. Ballard R.A., Charman N., McInnes A., Davidson J.A. Size, symbiotic effectiveness and genetic diversity of field pea rhizobia (*Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae*) populations in South Australian soils // Soil Biol. Biochem. 2004. V. 36. P. 1347–1355.
 37. Хакимова Л.Р., Сербяева Э.Р., Лавина А.М. Ростстимулирующая активность клубеньковых бактерий *Rhizobium leguminosarum*, выделенных из бобовых растений Южного Урала // Вестн. Оренбург. ГУ. 2017. № 9 (209). С. 96–99.
 38. Roumiantseva M.L., Muntyan V.S. Root nodule bacteria *Sinorhizobium meliloti*: tolerance to salinity and bacterial genetic determinants // Microbiology. 2015. V. 84. № 3. P. 303–318.
<https://doi.org/10.1134/S0026261715030170>
 39. Herridge D.F. Inoculation technology for legumes // Nitrogen-fixing leguminous symbioses. Nitrogen fixation: origins, applications, and research progress / Eds. Dilworth M.J., James E.K., Sprent J.I., Newton W.E. Dordrecht: Springer. V. 7.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3548-7_4
 40. Завалин А.А., Кашукоев М.В. Роль бобового предшественника в питании зерновых культур и повышение плодородия выщелоченного чернозема // Агрохимия. 1998. № 12. С. 20–24.

Reaction of Peas to Nitrogen Fertilizer and Inoculation of Seeds with Ritorfin on Sod-Podzolic Soil of Different Degree of Cultivation

M. A. Alyoshin^{a,b,#} and A. A. Zavalin^a

^aAll-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia

^bPerm State Agro-Technological University named after D.N. Pryanishnikov
Petrovskaya ul. 23, Perm 614990, Russia

[#]E-mail: matvei0704@mail.ru

The results of the vegetative experiment on the establishment of the joint effect of the biological preparation Rhizotorphin and N-fertilizer (doses $N_{0.05}$, $N_{0.10}$, $N_{0.15}$, $N_{0.20}$, $N_{0.25}$) on the formation of vegetative mass and the yield of seed pea grain when cultivated on weakly and medium cultivated sod-podzolic soil are presented. With an increase in the dose of N-fertilizer from $N_{0.05}$ to $N_{0.25}$, an increase in the yield of green mass of peas was observed by 3.4–22.2 g/vessel (on poorly cultivated) and by 10.3–35.5 g/vessel (on medium cultivated soil). The increase in grain yield from the use of Rhizotorphin on average in the experiment was 1.31 g/vessel on weakly and 1.66 g/vessel on medium cultivated soil. The application of N-fertilizer in medium cultivated soil conditions increased the responsiveness of seeded peas to inoculation to 1.70–1.87 g/vessel. When using Rhizotorphin and applying N-fertilizer, the accumulation of N in pea grain increased by 0.22 and 0.18% in accordance with the degree of cultivation of the soil. When using Rhizotorphin, N was accumulated in the roots, which positively affected the preservation of their activity and functioning at later stages of development, the intake and accumulation of N in the forming grain. The biological preparation Rhizotorphin influenced the accumulation and distribution of consumed N between the main and by-products of pea plants. Due to this, in the budding phase – the beginning of flowering, the dose increased to 0.83–0.88, and 38.0–65.5 mg N/vessel was additionally accumulated in the pea grain. With an increase in the dose of N-fertilizer over 0.05 g/kg on weakly and 0.20 g/kg on medium cultivated soil, the process of forming a symbiotic apparatus on the root system of peas was completely suppressed.

Key words: nitrogen fertilizer, doses, biological preparation Rhizotorphin, soil cultivation, seed peas, productivity, nitrogen accumulation, symbiotic apparatus.