

Научная статья / Research Article

УДК 635.656:631.147

DOI: 10.36718/1819-4036-2026-6-280-292

Елена Геннадьевна Ватракшина^{1✉}, Сергей Николаевич Ватракшин²,
Ришат Рифмилевич Абдулвалеев³, Азат Адипович Нигматьянов⁴,
Мухамет Минигалимович Хайбуллин⁵

^{1,2}Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

^{3,4,5}Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

¹vatrakshina324e@mail.ru

²vatrakshin@mail.ru

³rishatkim@mail.ru

⁴nigmatjanov@mail.ru

⁵khaibullinmuxamet@mail.ru

ИНТЕГРАЦИЯ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ И БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ В УПРАВЛЕНИИ БЕЛКОВОЙ ЦЕННОСТЬЮ ГОРОХА ПОСЕВНОГО (*PISUM SATIVUM* L.)

Цель исследования – определить влияние микрорельефа агроландшафта и применения биопрепаратов «Ризоторфин» и «РизоБаш» на урожайность, аминокислотный состав и функциональные свойства белка гороха посевного (*Pisum sativum* L.) в условиях Республики Башкортостан. Полевой опыт был проведен в 2024 г. на опытном участке ГБПОУ Аксеновский агропромышленный колледж им. Н.М. Сибирцева, расположенном на черноземах типичных с южной экспозицией склона. В факторный опыт включены четыре элемента микрорельефа (выровненный участок, верхняя, средняя и нижняя части склона) и три агротехнических варианта: без инокуляции (контроль), инокуляция клубеньковыми биопрепаратами «Ризоторфин» и «РизоБаш». В каждом варианте опыт закладывался в четырех повторностях. Оценивали урожайность, содержание общего белка по Кьельдалю, аминокислотный состав методом ионно-обменной жидкостной хроматографии, растворимость белка, индекс аминокислотной адекватности (IAA), содержание нитратного и аммонийного азота, фитиновой кислоты, танинов, фенольных соединений, β-каротина, флавоноидов и растворимых пищевых волокон. Все лабораторные анализы проводились в четырехкратной повторности, рассчитывались средние значения и стандартные отклонения. Инокуляция повысила урожайность на 8,4–19,6 %, содержание белка – на 10,1–20,4 %, максимальный выход белка составил 832 кг/га. При инокуляции «РизоБашем» в верхней части склона достигнуты наивысшее значение IAA (93,5 %) и растворимость белка до 68,4 %. Содержание фенольных соединений и флавоноидов увеличилось соответственно до 26,3 и 9,9 мг/100 г. Снижение содержания фитиновой кислоты и танинов указывает на улучшение функциональных свойств зерна.

Ключевые слова: горох посевной, инокуляция, белок, агроландшафт, биопрепараты, функциональное питание, растительный белок, биотехнология

Для цитирования: Ватракшина Е.Г., Ватракшин С.Н., Абдулвалеев Р.Р., и др. Интеграция агроэкологических и биотехнологических подходов в управлении белковой ценностью гороха посевного (*Pisum sativum* L.) // Вестник КрасГАУ. 2026. № 6. С. 280–292. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-6-280-292.

Elena Gennadievna Vatrakshina^{1✉}, Sergey Nikolaevich Vatrakshin²,
Rishat Rifmievich Abdulvaleev³, Azat Adipovich Nigmatyanov⁴,
Mukhamet Minigalimovich Khaibullin⁵

^{1,2}Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia

^{3,4,5}Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

¹vatrakshina324e@mail.ru

²vatrakshin@mail.ru

³rishatkim@mail.ru

⁴nigmatjanov@mail.ru

⁵khaibullinmuxamet@mail.ru

INTEGRATION OF AGROECOLOGICAL AND BIOTECHNOLOGICAL APPROACHES IN PROTEIN VALUE MANAGING OF FIELD PEA (*PISUM SATIVUM* L.)

*The aim of the study is to determine the influence of agricultural landscape microrelief and the use of the biopreparations Rizotorfin and RizoBash on the yield, amino acid composition, and functional properties of pea protein (*Pisum sativum* L.) in the Republic of Bashkortostan. The field experiment was conducted in 2024 at the experimental plot of the N.M. Sibircev Aksenovsky Agro-Industrial College, located on typical chernozem soils with a southern-facing slope. The factorial experiment included four microrelief elements (a leveled plot, the upper, middle, and lower parts of the slope) and three agronomic treatments: no inoculation (control) and inoculation with the nodule biopreparations Rizotorfin and RizoBash. Each treatment consisted of four replicates. The following parameters were evaluated: yield, total protein content according to the Kjeldahl method, amino acid composition using ion-exchange liquid chromatography, protein solubility, index of amino acid adequacy (IAA), nitrate and ammonium nitrogen content, phytic acid, tannins, phenolic compounds, β -carotene, flavonoids, and soluble dietary fiber. All laboratory analyses were performed in quadruplicate, and mean values and standard deviations were calculated. Inoculation increased yield by 8.4–19.6 %, protein content by 10.1–20.4 %, and the maximum protein yield was 832 kg/ha. Inoculation with RizoBash in the upper part of the slope resulted in the highest IAA value (93.5 %) and protein solubility of up to 68.4 %. The content of phenolic compounds and flavonoids increased to 26.3 and 9.9 mg/100 g, respectively. A decrease in phytic acid and tannin content indicates improved functional properties of the grain.*

Keywords: field pea, inoculation, protein, agricultural landscape, biopreparations, functional nutrition, plant protein, biotechnology

For citation: Vatrakshina EG, Vatrakshina SN, Abdulvaleev RR, et al. Integration of agroecological and biotechnological approaches in protein value managing of field pea (*Pisum sativum* L.). *Bulletin of KSAU*. 2026;(6):280-292. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-6-280-292.

Введение. Современное развитие пищевой промышленности характеризуется устойчивым ростом спроса на растительные источники полноценного белка, которые рассматриваются как основа для разработки продуктов функционального, спортивного, клинического и профилактического питания. Горох посевной (*Pisum sativum* L.) является одной из ключевых зернобобовых культур, востребованных благодаря высокой пищевой ценности, экологичности производства и адаптивности к широкому спектру агроклиматических условий. Белок гороха характеризуется оптимальным балансом незаменимых аминокислот, высокой усвояемостью и функциональными свойствами, что делает его перспективным компонентом белковых концентратов, изолятов, эмульсионных систем, растительных напитков и текстуратов, используемых в производстве аналогов мяса и молочных продуктов. В последние годы именно белок гороха рассматривается как одна из наиболее технологич-

ных альтернатив животным белкам в рамках глобальной тенденции по переходу к устойчивым пищевым системам [1–3].

Актуальность исследования заключается также в том, что качественные параметры горохового белка – аминокислотная полноценность, растворимость, фракционный состав, содержание биологически активных веществ – существенно зависят от агроэкологических условий. Микрорельеф агроландшафта определяет распределение влаги, тепла, элементов питания и степень аэрации почвы. Даже небольшие различия в положении на склоне вызывают значимые изменения в доступности минеральных форм азота, что влияет на процессы белкового метаболизма, накопление антиоксидантных соединений и уровень антинутриентов. Ряд исследований подчеркивает существенные различия в продуктивности и качестве гороха при размещении посевов на разных элементах рельефа [4–7]. При этом взаимосвязь между

микрозональностью, биопродуктивностью и функциональными свойствами белка остается недостаточно изученной, особенно в контексте современных требований к сырью для специализированного питания.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности производства гороха является биологизация агротехнологий за счет применения микробиологических препаратов на основе клубеньковых бактерий. Препараты «Ризоторфин» и «РизоБаш», содержащие активные штаммы *Rhizobium leguminosarum*, усиливают процессы симбиотической азотфиксации, формирование корневой системы, синтез аминокислот и накопление функциональных белковых фракций. В литературе отмечено, что использование биопрепаратов способствует улучшению аминокислотного профиля, увеличению доли лизина и треонина, а также изменению растворимости белка, что важно для его последующего биотехнологического применения [8–12]. Однако механизмы взаимодействия между инокулянтами, микрорельефом и биохимическим составом зерна требуют более детального изучения, особенно в условиях неоднородного агроландшафта.

Отдельного внимания заслуживает исследование антинутриентов — фитиновой кислоты, танинов, ингибиторов протеаз, которые снижают биодоступность белка и минералов. Снижение их концентрации под влиянием благоприятных почвенно-микробиологических условий рассматривается как способ повышения пищевой и технологической ценности зерна. Современные данные свидетельствуют, что биологическая инокуляция способна модифицировать процессы метаболизма в ризосфере, косвенно снижая уровень антинутриентов и усиливая синтез антиоксидантов [13–15]. Это открывает возможности для целенаправленного формирования сырья с заданными функциональными свойствами.

Несмотря на растущий интерес к устойчивому производству растительного белка, комплексные исследования, которые одновременно учитывают факторы микрорельефа и биотехнологические воздействия, проводятся редко. Целостная оценка взаимодействия агроэкологических условий и инокуляции является важной научной задачей, поскольку позволяет формировать научно обоснованные подходы к управлению белковой ценностью сельскохозяйственных культур и созданию сырья для функцио-

нального питания. Настоящее исследование направлено на устранение данного пробела путем изучения влияния микрозональности рельефа и биопрепаратов на продуктивность, аминокислотную полноценность и профиль биологически активных веществ гороха посевного. Полученные результаты могут быть использованы для разработки адаптированных агротехнологий, направленных на получение высококачественного белкового сырья в условиях изменчивого рельефа.

Цель исследования — установить влияние микрорельефа агроландшафта и применения биопрепаратов «Ризоторфин» и «РизоБаш» на урожайность, аминокислотный состав и функционально-биологические свойства белка гороха посевного (*Pisum sativum* L.).

Задачи: оценить влияние положения на склоне (верхняя, средняя, нижняя части и выровненный участок) на содержание нитратного и аммонийного азота в почве и белковую продуктивность гороха; изучить воздействие инокуляции семян гороха биопрепаратами «Ризоторфин» и «РизоБаш» на урожайность и общее содержание белка; провести аминокислотный анализ белка гороха, выращенного в различных агроэкологических условиях, и рассчитать индекс аминокислотной адекватности (IAA); определить растворимость белка и выход белка с единицы площади при разных вариантах опыта; оценить содержание биологически активных веществ (фенольных соединений, флавоноидов, каротиноидов, танинов, фитиновой кислоты, пищевых волокон) в зерне гороха; сформулировать биотехнологические рекомендации по использованию зерна гороха с повышенной белковой и функциональной ценностью.

Объекты и методы. Исследования проводились на посевах гороха посевного (*Pisum sativum* L.) сорта Томас, который был выбран в качестве модели благодаря своей высокой потенциальной урожайности, широкой адаптивности и признанным технологическим качествам зерна, востребованным в пищевой промышленности. Сорт относится к группе среднеспелых, характеризуется детерминантным типом роста, устойчивостью к полеганию и повышенным содержанием белка в семенах, что делает его перспективным для производства функциональных пищевых ингредиентов.

Полевой опыт был заложен в 2024 г. на территории учебно-опытного поля ГБПОУ Аксенов-

ский агропромышленный колледж им. Н.М. Сибирцева, расположенного в Республике Башкортостан. Регион характеризуется континентальным климатом с умеренным увлажнением. Почва опытного участка – типичный чернозем, обладающий высоким потенциальным плодородием. Важной особенностью места проведения исследований являлся выраженный микро-рельеф местности с южной экспозицией склона, что создавало естественный градиент условий увлажнения, температурного режима и обеспеченности элементами питания по элементам рельефа. Это позволило смоделировать в рамках одного поля различные агроэкологические ниши, типичные для зоны неустойчивого увлажнения.

Исследование проводилось по двухфакторной схеме, что позволило оценить как независимое, так и совместное влияние двух ключевых факторов на продуктивность и качество гороха.

Фактор А – положение на склоне (4 уровня):

- верхняя часть склона (наиболее дренированная зона с минимальным накоплением влаги);

- средняя часть склона (промежуточные условия по влагообеспеченности и терморегиму);

- нижняя часть склона (зона аккумуляции влаги и подвижных элементов питания);

- выровненный (плакорный) участок (контроль по рельефу, характеризующийся усредненными гидротермическими условиями).

– Фактор В – обработка семян биопрепаратами (3 уровня):

- контроль (без инокуляции, семена обработаны водой);

- инокуляция препаратом «Ризоторфин» на основе активных штаммов *Rhizobium leguminosarum*;

- инокуляция препаратом «РизоБаш», также содержащим штаммы клубеньковых бактерий *Rhizobium leguminosarum*, но отличающимся составом микробного консорциума и носителя.

Таким образом, было сформировано 12 вариантов опыта (4 элемента рельефа × 3 варианта обработки) в трехкратной повторности. Размещение делянок рендомизированное, площадь учетной делянки составляла 10 м². Общая агротехника возделывания (основная и предпосевная обработка почвы, норма высева, сроки сева и уборки) соответствовала зональным рекомен-

дациям для лесостепной зоны Республики Башкортостан и была единой для всех вариантов.

Для всесторонней оценки влияния изучаемых факторов применялся комплекс лабораторно-аналитических методов, соответствующих современным стандартам в области агрохимии, биохимии и пищевой технологии.

Урожайность зерна определяли методом сплошного учета с каждой делянки с последующим пересчетом на стандартную влажность (14 %) и выражением в т/га. Параллельно учитывались структурные показатели: число растений на 1 м², число бобов и семян на растении, масса 1000 семян.

Содержание минеральных форм азота (нитратного NO₃⁻ и аммонийного NH₄⁺) в почве определяли в динамике по основным фазам вегетации гороха (всходы, бутонизация, налив бобов). Отбор почвенных образцов проводился послойно с глубины 0–30 см. Концентрацию нитратного азота устанавливали фотометрически после восстановления на кадмиевом редуторе, аммонийного азота – колориметрически по методу Несслера. Эти данные позволили оценить доступность азота в различных микроразонах.

Биохимический анализ зерна. Содержание сырого протеина определяли по общепринятому методу Кьельдаля (ГОСТ 26176-91) с использованием коэффициента пересчета азота в белок, равного 6,25. Выход белка с единицы площади (кг/га) рассчитывали как произведение урожайности зерна (т/га) и процентного содержания в нем белка.

Анализ аминокислотного состава проводился методом ионно-обменной хроматографии с постколоночной дериватизацией нингидрином на автоматизированном реакционном модуле АРМ-1000 (Sevko&Co, Россия). Предварительно белки подвергали кислотному гидролизу (6 н. HCl, 110 °C, 24 ч) для определения суммы свободных и связанных аминокислот. На основе полученного профиля рассчитывался индекс аминокислотной адекватности (IAA) как среднее отношение содержания каждой незаменимой аминокислоты в исследуемом белке к ее содержанию в эталонном белке (стандарт FAO/WHO, 2007).

Функциональное свойство – растворимость белкового концентрата, полученного из зерна, оценивали в водной среде при pH 7,0 по стандартной методике AOAC 991.20. Этот показатель является ключевым для оценки технологи-

ческого потенциала белка при создании эмульсий, гелей и напитков.

Анализ биологически активных и антипитательных веществ. Содержание фенольных соединений определяли спектрофотометрически по методу Фолина – Чокальте, флавоноидов – методом образования комплексов с хлоридом алюминия с пересчетом на рутин, каротиноидов (β -каротин) – экстракцией и спектрофотометрией в гексане.

Концентрацию фитиновой кислоты устанавливали по методу Графа и Штаутера в модификации M. Latta & M. Eskin (1980), основанному на образовании окрашенного комплекса с реактивом Wade. Содержание конденсированных танинов (проантоцианидинов) оценивали ванилиновым методом в сернокислой среде.

Содержание растворимых пищевых волокон определяли ферментативно-гравиметрическим методом AOAC 991.43.

Все полученные количественные данные подвергнуты статистическому анализу с использованием пакетов программ MS Excel и Statistica 12.0. Для оценки достоверности влияния факторов (положение на склоне, обработка биопрепаратами и их взаимодействие) применяли двух-

факторный дисперсионный анализ (ANOVA). Различия между средними значениями по вариантам считались статистически значимыми при уровне доверительной вероятности $p < 0,05$. Для визуализации результатов использовано построение таблиц и графиков. Представленный комплекс методов обеспечивает репрезентативность и надежность полученных результатов, позволяя сделать обоснованные выводы о влиянии агроэкологических и биотехнологических факторов на качество белкового сырья из гороха.

Результаты и их обсуждение. Проведенный мониторинг содержания доступных форм азота в почве выявил четкую зависимость от положения на склоне и фазы вегетации гороха. На всех участках наблюдалась характерная динамика: повышение концентраций нитратного (NO_3) и аммонийного (NH_4) азота к критической фазе бутонизации с последующим снижением к периоду налива бобов (рис. 1). Это согласуется с повышенной потребностью растений в доступном азоте в период активного роста вегетативной массы и формирования генеративных органов.

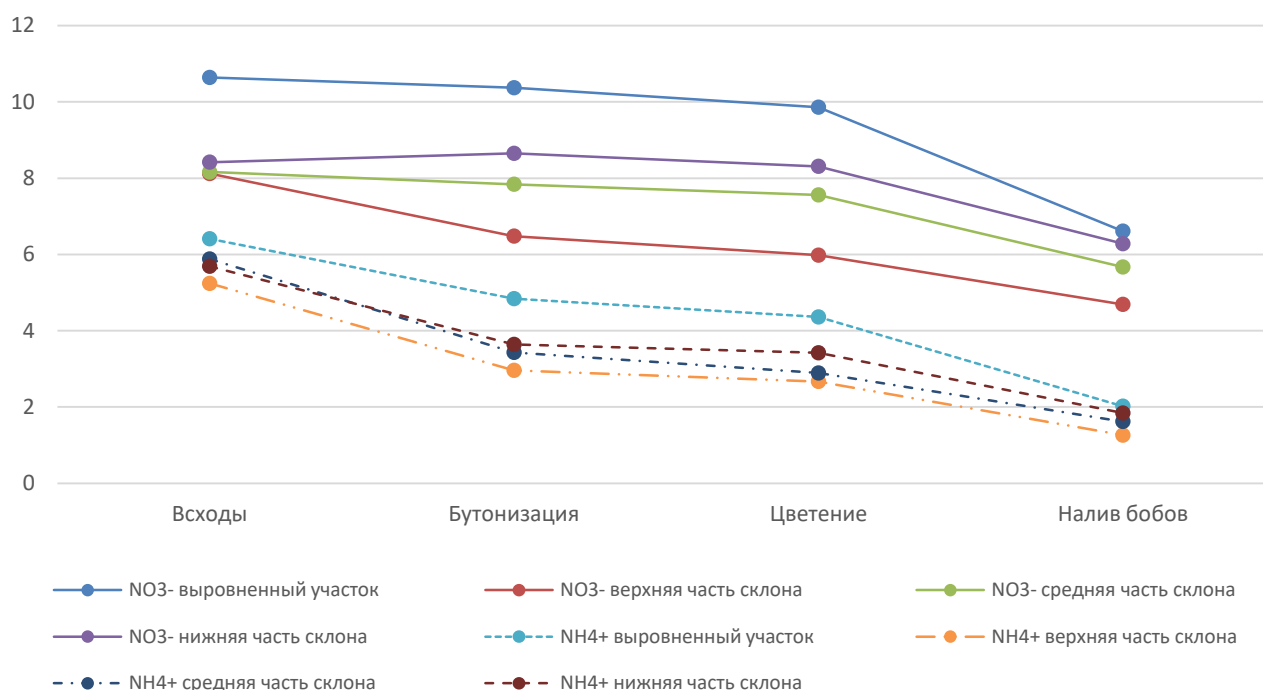


Рис. 1. Динамика содержания нитратного и аммонийного азота в почве в зависимости от положения на склоне и фазы вегетации гороха
Dynamics of nitrate and ammonium nitrogen content in soil depending on slope position and pea growth stage

Статистически значимые различия были зафиксированы между элементами рельефа. Так, в фазу бутонизации в верхней части склона содержание NO_3^- достигало максимума – 10,37 мг/кг почвы, тогда как в нижней части этот показатель был достоверно ниже – 8,65 мг/кг. Аналогичная тенденция наблюдалась для NH_4^+ : 4,84 и 3,64 мг/кг соответственно. Более высокое содержание минерального азота в верхней части склона, вероятно, связано с лучшей аэрацией и более интенсивными процессами нитрификации в условиях пониженного увлажнения. В нижней части склона, несмотря на потенциаль-

но больший запас общего азота, его доступные формы могли подвергаться вымыванию или иммобилизации в микробной биомассе, что ограничивало их доступность для растений в отдельные периоды.

Результаты полевого опыта подтвердили значимое влияние как микрорельефа, так и инокуляции биопрепаратами на продуктивность гороха (табл. 1). В контрольных вариантах (без инокуляции) урожайность варьировала от 2,44 т/га на выровненном участке до 2,72 т/га в нижней части склона, демонстрируя выгоду зон аккумуляции влаги.

Таблица 1

Урожайность, содержание и выход белка гороха в зависимости от рельефа и инокуляции
Yield, protein content and protein output of field pea depending on slope position and inoculation

Элемент рельефа	Показатель	I вариант (контрольный)	II вариант	Биол. эффект, %	III вариант	Биол. эффект, %
Ровный участок	Урожайность, т/га*	2,44	2,67	9,4	2,76	13,0
	Белок, %	20,6±0,32	22,9±0,31	11,2	23,7±0,32	15,2
	Белок, кг/га	503±7,74	611±8,35	21,5	654±8,85	30,0
Верхняя часть склона	Урожайность, т/га*	2,51	2,72	8,4	2,79	11,2
	Белок, %	21,7±0,30	23,9±0,32	10,1	24,6±0,31	13,4
	Белок, кг/га	545±7,44	651±8,63	19,5	686±8,73	25,9
Средняя часть склона	Урожайность, т/га*	2,63	2,94	11,8	3,06	16,3
	Белок, %	21,5±0,32	24,3±0,44	13,0	25,2±0,39	17,5
	Белок, кг/га	565±8,43	714±12,95	26,4	772±12,07	36,7
Нижняя часть склона	Урожайность, т/га*	2,72	3,08	13,2	3,25	19,6
	Белок, %	21,0±0,40	24,3±0,38	15,7	25,6±0,40	20,4
	Белок, кг/га	572±10,93	748±11,64	30,8	832±12,96	45,5

*НСР₀₅: фактор А (элемент рельефа) – 0,03 т/га; фактор В (обработка семян) – 0,03 т/га; фактор АВ – 0,05.

Обработка семян биопрепаратами достоверно увеличила все показатели. Наибольший эффект обеспечил препарат «РизоБаш», под воздействием которого урожайность возрастала на 11,2–19,6 % в зависимости от элемента рельефа относительно контроля. Максимальная урожайность (3,25 т/га) и рекордный выход белка с гектара (832 кг/га) были получены именно при сочетании инокуляции «РизоБаш» и размещения посевов в нижней части склона. Это сочетание, судя по всему, создало оптимальный си-

нергетический эффект: биопрепарат усилил симбиотическую фиксацию атмосферного азота, а благоприятный гидротермический режим нижней части склона способствовал его максимальной реализации в урожае биомассы. Препарат «Ризоторфин» также показал положительный, но менее выраженный результат, что указывает на возможные различия в эффективности штаммов или формуляций биопрепаратов.

Аминокислотный анализ выявил позитивное влияние инокуляции на качество белка (табл. 2).

Во всех вариантах с применением биопрепаратов, особенно «РизоБаш», наблюдалось достоверное увеличение доли незаменимых аминокислот. Наибольший прирост отмечался для лизина (до 7,5 % от общего белка), треонина (до 4,7 %) и аргинина (до 8,0 %) – аминокислот,

наиболее часто лимитирующих питательную ценность растительных белков. Это согласуется с данными о том, что активная симбиотическая азотфиксация стимулирует синтез именно этих аминокислот в растении.

Таблица 2

Аминокислотный состав белка гороха на различных элементах рельефа, % от общего белка
Amino acid composition of field pea protein at different slope positions, % of total protein

Аминокислота	Расположение посевов											
	Ровный участок			Верхняя часть склона			Средняя часть склона			Нижняя часть склона		
	Вариант опыта											
I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Лизин	6,1	6,8	7,0	6,6	7,2	7,5	6,3	7,0	7,2	6,0	6,6	6,9
Треонин	3,7	4,1	4,4	3,9	4,3	4,7	3,8	4,2	4,5	3,6	4,0	4,3
Валин	4,8	5,1	5,4	5,0	5,4	5,6	4,9	5,3	5,5	4,7	5,0	5,3
Изолейцин	3,9	4,1	4,3	4,1	4,3	4,5	4,0	4,2	4,4	3,8	4,0	4,2
Лейцин	6,4	6,6	6,8	6,7	6,9	7,1	6,5	6,7	6,9	6,3	6,5	6,7
Фенилаланин	4,1	4,4	4,6	4,3	4,6	4,8	4,2	4,5	4,7	4,0	4,3	4,5
Аргинин	7,1	7,5	7,7	7,3	7,7	8,0	7,2	7,6	7,8	7,0	7,3	7,5

Ключевой технологический показатель – растворимость белка – также значительно повышался под действием биопрепаратов (табл. 3). Максимальная растворимость (68,4 %) была зафиксирована в варианте «РизоБаш» на верхней части склона. Инокуляция увеличивала этот показатель на 4,3–6,9 процентных пункта, что имеет принципиальное значение для дальнейшего использования белка в производстве на-

питков, эмульсий и гелей. Парадоксально, что наивысшая растворимость была достигнута не в зоне максимальной урожайности (низ склона), а в более стрессовых условиях верха склона. Это позволяет предположить, что в условиях умеренного дефицита влаги и при активной работе ризобий происходит синтез белковых фракций (например альбуминов) с более высокой нативной растворимостью.

Таблица 3

Растворимость белка гороха, % от общего содержания
Solubility of field pea protein, % of total content

Расположение посевов	Вариант опыта		
	I	II	III
Ровный участок	58,8±0,56	63,3±0,56	65,1±0,72
Верхняя часть склона	61,5±0,56	66,2±0,56	68,4±0,73
Средняя часть склона	59,7±0,56	64,5±0,56	66,8±0,70
Нижняя часть склона	57,9±0,54	62,0±0,73	64,3±0,73

Обобщающим показателем питательной ценности выступил индекс аминокислотной адекватности (IAA). Его значения коррелировали с данными аминокислотного анализа: максимальный IAA (93,5 %) был получен при инокуляции «РизоБаш» на верхней части склона (табл. 4).

Это свидетельствует, что белок, сформированный в данных условиях, наиболее полно соответствует эталонному белку по сбалансированности незаменимых аминокислот и представляет наибольшую ценность для специализированного питания.

Индекс аминокислотной адекватности (IAA), %
Amino acid adequacy index (IAA), %

Расположение посевов	Вариант опыта		
	I	II	III
Ровный участок	82,8	88,4	90,8
Верхняя часть склона	86,4	91,2	93,5
Средняя часть склона	84,1	89,7	92,0
Нижняя часть склона	81,5	87,3	90,1

Комплексный анализ зерна выявил значимые изменения в содержании ценных и нежелательных соединений под влиянием изучаемых факторов (табл. 5). Применение биопрепаратов, и в особенности «РизоБаш», способствовало следующему:

- содержание фенольных соединений возросло до 26,3 мг/100 г, флавоноидов – до 9,9 мг/100 г, β-каротина – до 1,8 мг/100 г;
- концентрация фитиновой кислоты уменьшалась до 510 мг/100 г, а танинов – до 39,5 мг/100 г.

Таблица 5

Содержание биологически активных веществ в зерне гороха, мг/100 г сухого вещества
Content of biologically active compounds in field pea grain, mg/100 g dry matter

Показатель	Расположение посевов											
	Ровный участок			Верхняя часть склона			Средняя часть склона			Нижняя часть склона		
	Вариант опыта											
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Фенольные соединения	18,9	22,2	23,9	21,4	24,7	26,3	19,8	23,1	25,0	18,5	21,6	23,8
Флавоноиды (в пересчете на рутин)	7,2	8,3	8,9	8,2	9,1	9,9	7,6	8,4	9,2	7,0	7,9	8,7
Каротиноиды (β-каротин)	1,1	1,3	1,5	1,4	1,6	1,8	1,2	1,4	1,6	1,0	1,2	1,4
Фитиновая кислота	590	555	530	560	525	510	580	540	520	600	565	545
Танины	48,0	44,1	41,0	45,2	41,8	39,5	47,1	43,3	40,2	49,3	45,5	42,7
Растворимые пищевые волокна	6,6	7,2	7,7	7,1	7,6	8,0	6,8	7,4	7,9	6,5	7,0	7,6

Этот двунаправленный эффект (усиление полезного и ослабление вредного) крайне важен для пищевой технологии. Снижение фитатов и танинов повышает биодоступность микроэлементов и усвояемость белка, а рост содержания антиоксидантов добавляет продукту функциональные свойства, повышая его устойчивость к окислению и потенциальную пользу для здоровья.

Полученные результаты раскрывают комплексный характер взаимодействия абиотического (микрорельеф) и биотического (инокулянт) факторов в формировании не только урожайности, но и, что особенно важно, качества белкового сырья из гороха.

Установленный факт максимальной урожайности и выхода белка в нижней части склона при инокуляции полностью согласуется с классическими представлениями агроэкологии о ро-

ли рельефа в перераспределении ресурсов [5, 6]. Зона аккумуляции влаги создает базовые условия для высокой продуктивности. Биопрепарат в этой ситуации играет роль катализатора, усиливая симбиотическую фиксацию азота и переводя потенциал местообитания в дополнительный урожай и белок. Наш результат, показывающий прирост выхода белка на 45,5 % в этом варианте, количественно подтверждает высокую эффективность такого сочетания.

Наиболее интригующим и практически значимым выводом является то, что наивысшие показатели качества белка (аминокислотная сбалансированность, растворимость, IAA) были достигнуты не в зоне максимального урожая, а в более стрессовых условиях верхней части склона, особенно при использовании «РизоБаш». Это можно объяснить с позиций экологической физиологии растений. Умеренный стресс (некритичный дефицит влаги, лучшая аэрация) в сочетании с эффективной инокуляцией, по-видимому, смещает метаболические потоки растения. Вместо преимущественного роста биомассы (как внизу склона) активируются пути синтеза высококачественных запасных белков и защитных вторичных метаболитов (антиоксидантов). Биопрепарат здесь играет ключевую роль, обеспечивая растение доступным азотом даже в условиях, где мобилизация почвенного азота может быть лимитирована. Данный эффект согласуется с работами, отмечающими улучшение аминокислотного состава при симбиотической фиксации [3, 8], и добавляет к ним важный ландшафтный контекст.

Технологические и функциональные следствия. Увеличение растворимости белка на 6–7 % – это не просто статистически значимая разница, а качественный скачок для технологий переработки. Белок с растворимостью 68 % существенно превосходит по функциональности белок с 61 %, открывая возможности для создания более стабильных и сложных пищевых систем [9]. Параллельные процессы снижения антинутриентов и роста антиоксидантов, наблюдаемые в нашем исследовании, напрямую указывают на повышение биодоступности питательных веществ и добавленной функциональной ценности сырья. Этот эффект, вероятно, опосредован влиянием ризобий на биохимические процессы в ризосфере и самом растении, что отмечалось и другими авторами [13–15].

Полученные данные четко разделяют зоны количественного и качественного максимума в пределах одного поля. Это имеет прямое прикладное значение для прецизионного земледелия и сегментации сырья:

- нижние части склонов с инокуляцией «РизоБаш» – целевая зона для получения максимального количества белкового сырья;

- верхние и средние части склонов с инокуляцией «РизоБаш» – целевая зона для производства элитного сырья с повышенной функциональностью для продуктов специализированного и спортивного питания, где качество и технологические свойства белка критичны.

Таким образом, исследование демонстрирует, что учет микрорельефа позволяет не просто учитывать неоднородность поля, но и целенаправленно управлять ею с помощью биотехнологических приемов для получения сырья с заданными свойствами. Интеграция агроландшафтного подхода и микробиологической инокуляции создает научную основу для нового уровня управления качеством растительного белка в интересах пищевой индустрии.

Заключение. Проведенные комплексные исследования подтвердили высокую эффективность интеграции агроэкологических и биотехнологических методов в управлении не только урожайностью, но и, что принципиально важно, пищевой и технологической ценностью гороха посевного. Установлено, что микрорельеф агроландшафта и инокуляция семян биопрепаратами оказывают взаимодополняющее и синергетическое воздействие на продуктивность, биохимический состав и функциональные свойства белка, формируя четкую пространственную дифференциацию качества сырья в пределах одного поля.

Научно-практические выводы работы:

1. Микрорельеф является определяющим фактором для продуктивности, но не для качества белка. Наибольшая урожайность зерна (до 3,25 т/га) и максимальный выход белка с единицы площади (832 кг/га) были достигнуты в нижней части склона – зоне аккумуляции влаги и элементов питания. Однако наивысшие показатели качества белка сформировались в иных условиях.

2. Биопрепараты – ключевой инструмент управления качеством. Инокуляция, в особенности препаратом «РизоБаш», стала главным драйвером улучшения качественных характери-

стик. Она обеспечила достоверное увеличение содержания общего белка (на 15–20 %), оптимизацию аминокислотного состава с приростом лимитирующих аминокислот (лизина, треонина), а также значительное повышение технологически важной растворимости белка (до 68,4 %).

3. Выявлены зоны формирования качественного зерна в агроландшафте. Парадоксальным и наиболее значимым результатом стало установление того, что верхняя и средняя части склона в сочетании с инокуляцией «РизоБаш» являются оптимальными зонами для формирования высококачественного белкового сырья с повышенной функциональностью. Именно здесь были зафиксированы наибольшие значения индекса аминокислотной адекватности (IAA до 93,5 %), максимальная концентрация антиоксидантов (фенолов, флавоноидов, β -каротина) и минимальное содержание антинутриентов (фитиновой кислоты и танинов).

4. Достигнут двунаправленный биохимический эффект. Комплексное применение подхода позволило не просто увеличить количество белка, но и целенаправленно улучшить его биохимический профиль: повысить биодоступность (за счет снижения антинутриентов) и усилить функционально-технологические свойства (за счет роста растворимости и антиоксидантной активности).

На основе полученных данных можно сформулировать следующие биотехнологические рекомендации для сельхозпроизводителей и перерабатывающей промышленности:

- Для получения максимального количества белкового сырья целесообразно концентрировать усилия на инокуляции семян препаратом «РизоБаш» в нижних частях склонов.

- Для производства элитного сырья для функционального, спортивного и специализированного питания рекомендуется выделять верхние и средние части склонов с обязательной инокуляцией «РизоБаш». Зерно, выращенное в этих условиях, обладает превосходной аминокислотной сбалансированностью, высокой растворимостью и улучшенным профилем биологически активных

веществ, что делает его идеальным для создания белковых концентратов, изолятов и текстурированных продуктов высокой добавленной стоимости.

Настоящая работа вносит вклад в развитие концепции прецизионного биоориентированного земледелия, демонстрируя, что учет внутриполевой неоднородности (микрорельефа) позволяет не нивелировать ее, а использовать для дифференцированного получения сырья с заданными свойствами.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- расширение спектра изучаемых зернобобовых культур (нут, чечевица, соя) и биопрепаратов для выявления универсальных закономерностей;

- глубокое изучение пептидного профиля и структурно-функциональных свойств белка, сформированного в различных агроэкологических нишах;

- исследование влияния выявленных факторов на ферментативную активность, перевариваемость и пребиотический потенциал белковых продуктов;

- разработка цифровых моделей и ГИС-решений для картографирования «зон качества» белкового сырья в рамках технологий точного земледелия.

Таким образом, интеграция агроландшафтного анализа и современных биотехнологий открывает новые, экономически и экологически обоснованные пути для устойчивого производства высококачественного растительного белка, отвечающего вызовам современной пищевой индустрии и запросам общества в области здорового питания.

Благодарность. Авторы выражают признательность коллегам и руководству ГБПОУ Аксеновский агропромышленный колледж имени Н.М. Сибирцева, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ и ФГБОУ ВО Уфимский ГНТУ за методическую помощь в организации исследований.

Список источников

1. Исмагилов Р.Р., Нурлыгаянов Р.Б., Хадыев И.Р., и др. Технология возделывания сои, вики, нута и кормовых бобов в Республике Башкортостан. Уфа: Башкирский ГАУ, 2019. 52 с. EDN: QHNECP.
2. Ашиев А.Р., Хабибуллин К.Н., Скулова М.В. Влияние вегетационного периода на содержание белка в семенах коллекционных образцов гороха // *Зерновое хозяйство России*. 2022. Т. 14, № 6. С. 5–10. DOI: 10.31367/2079-8725-2022-83-6-5-10. EDN: PZYONV.
3. Воскобулова Н.И., Верещагина А.С., Ураскулов Р.Ш., и др. Аминокислотный состав и биологическая ценность белка гороха в зависимости от приемов возделывания // *Животноводство и кормопроизводство*. 2019. Т. 102, № 3. С. 117–25. DOI: 10.33284/2658-3135-102-3-117. EDN: CWXQLW.
4. Дашкевич С.М., Мамыкин Е.В., Крадецкая О.О., и др. Качество зерна гороха в зависимости от технологий возделывания и доз внесения удобрений // *Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина*. 2023. № 2 (117). С. 213–224. DOI: 10.51452/kazatu.2023.2(117).1398. EDN: PQWHCB.
5. Абдулвалеев Р.Р., Ватракшина Е.Г., Ватракшин С.Н. Изменение урожайности гороха посевного сортов Памяти Хангильдина и Рокет в зависимости от частей южного склона в условиях Предуралья Республики Башкортостан. В сб.: *Международная научно-практическая конференция «Современные тенденции технологического развития АПК», посвященная Десятилетию науки и технологий и 300-летию Российской академии наук*. Ижевск, 2025. Т. 1. С. 3–9.
6. Лысенко А.А. Урожайность сортов зернового гороха при изменении погодных условий в приазовской зоне Ростовской области // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2020. № 2 (34). С. 13–20. DOI: 10.24411/2309-348X-2020-11164. EDN: ENOXWB.
7. Надежина Н.В., Соколов В.А., Мамадназарбеков А.Ф. Эффективность ландшафтно-адаптированных технологий совместного выращивания гороха посевного безлисточкового морфотипа с зерновыми культурами в Верхневолжье // *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2019. № 4 (29). С. 26–39. DOI: 10.35523/2307-5872-2019-29-4-26-39. EDN: DFJCJP.
8. Shanthakumar S., Sathish Kumar T., Ilakiya T., et al. Pea Protein: Structure, Extraction, Functional Properties, and Applications // *Molecules*. 2022. Vol. 27, № 16. P. 5354. DOI: 10.3390/molecules 27165354.
9. Konieczny D., Winiarska-Mieczan A., Baranowska-Wójcik E. Nutritional and functional properties of legume-based foods // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. Vol. 60, N 9. P. 1471–1490. DOI: 10.1080/10408398.2019.1573806.
10. Пахотина И.В., Омелянюк Л.В., Игнатьева Е.Ю., и др. Особенности формирования содержания белка в зерне гороха в условиях Западной Сибири // *Вестник КрасГАУ*. 2020. № 10 (163). С. 60–67. DOI: 10.36718/1819-4036-2020-10-60-67. EDN: YMAUHU.
11. Хабибуллин К.Н., Ашиев А.Р., Скулова М.В. Оценка адаптивности продуктивности растений коллекции гороха посевного // *Зерновое хозяйство России*. 2020. № 1. С. 33–36. DOI: 10.31367/2079-8725-2020-67-1-33-36. EDN: XLAAPC.
12. Путина О.В., Путин О.В., Жуков В.А., и др. Влияние дополнительной инокуляции *Rhizobium Leguminosarum* на растения овощного гороха // *Овощи России*. 2024. № 4. С. 85–91. DOI: 10.18619/2072-9146-2024-4-85-91. EDN: HUVHCI.
13. Egamberdieva D., Jabborova D., Berg G. Synergistic effects of plant growth-promoting rhizobacteria and microbial consortia on legume growth, nutrient acquisition and stress resilience // *Plant and Soil*. 2021. Vol. 461. P. 1-17. DOI: 10.1007/s11104-021-04878-3.
14. Турусов В.И., Гармашов В.М., Корнилов И.М., и др. Урожайность и структура урожая гороха при различных способах обработки почвы в условиях юго-востока ЦЧР // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2020. № 2 (34). С. 5–12. DOI: 10.24411/2309-348X-2020-11163. EDN: KXWRGR.
15. Шакирзянова М.С. Экологическая пластичность и стабильность перспективных линий гороха // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 16, № 4 (64). С. 42–46. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-42-46. EDN: VUEPQZ.

References

1. Ismagilov RR, Nurlygayanov RB, Khadyev IR, et al. *Technologiya vozdelivanya soi, viki, nuta i kormovikh bobov Respublike Bashkortostan*. Ufa: Bashkirskiy GAU; 2019. 52 p. (In Russ.). EDN: QHNECP.
2. Ashiev AR, Khabibullin KN, Skulova MV. The Effect of a Vegetation Period on Protein Percentage in Seed of the Pea Collection Samples. *Grain Economy Of Russia*. 2022;14(6):5-10. (In Russ.). DOI: 10.31367/2079-8725-2022-83-6-5-10. EDN: PZYONV.
3. Voskobulova N, Vereshagina A, Uraskulov R, et al. M. Amino Acid Composition and Biological Value of Pea Protein Depending on Cultivation Techniques. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;102(3):117-125. (In Russ.). DOI: 10.33284/2658-3135-102-3-117. EDN: CWXQLW.
4. Dashkevich SM, Mamykin EV, Kradetskaya OO, et al. Pea Grain Quality Depending on Cultivation Technologies and Fertilizer Dose. *Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University*. 2023. 2 (117). 213-224. (In Russ.). DOI: 10.51452/kazatu.2023.2(117).1398. EDN: PQWHCB
5. Abdulvaleev RR, Vatrakshina EG, Vatrakshin SN. Izmenenie urozhajnosti goroxa posevnogo sortov Pamyati Xangil'dina i Raket v zavisimosti ot chastej yuzhnogo sklona v usloviyax Predural'ya Respubliki Bashkortostan. In: *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Sovremennyy'e tendencii texnologicheskogo razvitiya APK", posvyashhennaya Desyatiletiyu nauki i texnologij i 300-letiyu Rossijskoj akademii nauk*. Izhevsk; 2025. Vol. 1. P. 3-9. (In Russ.).
6. Lysenko AA. Productivity and quality of Grain pea varieties cultivated in the Azov area of the Rostov region depending on hydrothermal factors. *Grain economy of Russia*. 2020;2(34):13-20. (In Russ.). DOI: 10.24411/2309-348X-2020-11164. EDN: ENOXWB.
7. Nadezhina NV, Sokolov VA, Mamadnazarbekov AF. Landscape-Adapted Technologies Efficiency of Joint Cultivation of Seedless Leafless Morphotype Peas with Grain Crops in the Upper Volga Region. *Agrarian Journal of Upper Volga Region*. 2019;4(29):26-39. (In Russ.). DOI: 10.35523/2307-5872-2019-29-4-26-39. EDN: DFJCJP.
8. Shanthakumar S., Sathish Kumar T., Ilakiya T. et al. Pea Protein: Structure, Extraction, Functional Properties, and Applications. *Molecules*. 2022;27(16):5354. DOI: 10.3390/molecules27165354.
9. Konieczny D, Winiarska-Mieczan A, Baranowska-Wójcik E. Nutritional and functional properties of legume-based foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020;60(9):1471-1490. DOI: 10.1080/10408398.2019.1573806.
10. Pakhotina IV, Omelyanyuk LV, Ignatyeva EYu, et al. The Features of Protein Formation in Pea Grain under the Conditions of West Siberia. *Bulletin of KSAU*. 2020;10(163):60-67. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2020-10-60-67. EDN: YMAUHU.
11. Khabibullin KN, Ashiev AR, Skulova MV. The Estimation of the Adaptability of Collection Pea Plants Productivity. *Grain Economy of Russia*. 2020;1(33-36). (In Russ.). DOI: 10.31367/2079-8725-2020-67-1-33-36. EDN: XLAAPC.
12. Putina OV, Putin OV, Zhukov VA, et al. Effect Of Additional Inoculation With Rhizobium Leguminosarum On Vegetable Pea Plants // *Vegetable Crops Of Russia*. 2024. № 4. P. 85-91. (In Russ.). DOI: 10.18619/2072-9146-2024-4-85-91/ EDN: HUVHCI.
13. Egamberdieva D, Jabborova D, Berg G. Synergistic effects of plant growth-promoting rhizobacteria and microbial consortia on legume growth, nutrient acquisition and stress resilience. *Plant and Soil*. 2021;461:1-17. DOI: 10.1007/s11104-021-04878-3.
14. Turusov VI, Garmashov VM, Kornilov IM, et al. Productivity And Structure Of The Pea Crop Under Various Methods Of Tillage In The Conditions Of The South-East Of The Central Chernozem Region // *Legumes And Groat Crops*. 2020. № 2 (34). P. 5-12. (In Russ.) DOI: 10.24411/2309-348X-2020-11163. EDN: KXWRGR.
15. Shakirzyanova MS. Ecological Plasticity And Stability Of Prospective Pea Lines // *Vestnik Of The Kazan State Agrarian University*. 2021. Vol. 16. 4 (64). 42-46. (In Russ.). DOI: 10.12737/2073-0462-2022-42-46. EDN: VUEPQZ

Статья принята к публикации 10.04.2026 / The article accepted for publication 10.04.2026.

Информация об авторах:

Елена Геннадьевна Ватракшина, аспирант кафедры почвоведения, агрохимии и точного земледелия

Сергей Николаевич Ватракшин, аспирант кафедры почвоведения, агрохимии и точного земледелия

Ришат Рифмилевич Абдулвалеев, профессор кафедры современных технологий пищевых индустрий, доктор сельскохозяйственных наук

Азат Адипович Нигматьянов, доцент кафедры современных технологий пищевых индустрий, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

Мухамет Минигалимович Хайбуллин, профессор кафедры современных технологий пищевых индустрий, доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Information about the authors:

Elena Gennadievna Vatrakshina, Postgraduate student at the Department of Soil Science, Agrochemistry and Precision Agriculture

Sergey Nikolaevich Vatrakshin, Postgraduate student at the Department of Soil Science, Agrochemistry and Precision Agriculture

Rishat Rifmievich Abdulvaleev, Professor at the Department of Modern Technologies of Food Industries, Doctor of Agricultural Sciences

Azat Adipovich Nigmatyanov, Associate Professor at the Department of Modern Technologies of Food Industries, Candidate of Agricultural Sciences, Docent

Mukhamet Minigalimovich Khaibullin, Professor at the Department of Modern Technologies of Food Industries, Doctor of Agricultural Sciences, Professor

