

УДК 631.84:631.584.5:633.358:633.11:631.582

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЗОТНОГО УДОБРЕНИЯ В СМЕШАННЫХ ПОСЕВАХ ГОРОХА И ПШЕНИЦЫ В СЕВООБОРОТЕ

© 2021 г. М. А. Алёшин^{1,*}, А. А. Завалин²¹ Пермский государственный аграрно-технологический университет им. академика Д. Н. Прянишникова
614990 Пермь, ул. Петропавловская, 23, Россия² Всероссийский научный-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

*E-mail: matvei0704@mail.ru

Поступила в редакцию 12.05.2021 г.

После доработки 09.06.2021 г.

Принята к публикации 10.08.2021 г.

В полевом опыте изучили влияние уровней азотного питания (N0, N30, N60) на урожайность смешанных посевов гороха и яровой пшеницы (пшеница 75% + горох 25%, пшеница 50% + горох 50%, пшеница 25% + горох 75%) в сравнении с одновидовыми посевами (яровая пшеница, посевной горох). Максимальная урожайность зерносеменной массы (12.1 т/га) была получена в смешанном агроценозе пшеница 25% + горох 75%, при внесении N60. При увеличении доли гороха (25%–50%–75%) возрастало содержание сырого протеина до 139–149 г/кг (1-й класс) и снижалось количество сырой клетчатки до 248 г/кг (1-й класс) в составе полученного корма. Накопление пожнивно-корневых остатков (ПКО) в почве определялось продуктивностью и составом смешанных посевов и достигало 3.33–4.05, 4.04–5.24, 4.44–5.86 т/га при внесении N0, N30, N60. После уборки в почву поступало общего азота 16.0–19.5 (вариант пшеница 75% + горох 25%), 38.7–50.3 (вариант пшеница 50% + горох 50%) и 63.9–84.3 (вариант пшеница 25% + горох 75%) кг/га, при этом в зависимости от состава смешанного посева 20–108 кг N/га поступало за счет симбиотической азотфиксации. При увеличении доли гороха в смешанном посеве >50% отмечено более высокое содержание азота (>2%) в составе зерносеменной массы и более узкое соотношение C : N = 25.4–27.5. При выращивании ярового ячменя в севообороте после смешанных посевов гороха и пшеницы на фоне N0 прибавка урожайности зерна составила 0.33–0.71 т/га.

Ключевые слова: дозы азота, смешанный посев, посевной горох, яровая пшеница, урожайность, зерносемена, биохимический состав, биологический азот, пожнивно-корневые остатки, соотношение C : N.

DOI: 10.31857/S000218812111003X

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое развитие сельскохозяйственной отрасли в значительной степени зависит от возобновляемых ресурсов, таких как биологически фиксированный азот. Наряду с одновидовыми посевами, смешанные посевы зерновых бобовых и злаковых культур способны обеспечить вовлечение в биологический цикл значительного количества азота атмосферы [1, 2], высокую продуктивность [3, 4] и эффективное использование пашни [5], а также целый ряд сопутствующих экологических преимуществ в агроэкосистемах [6–8].

Благодаря взаимодействию компонентов в смешанном посеве [9] наблюдают усиление интенсивности потребления элементов [10, 11] и оптимизацию условий минерального питания. В работе

[12] приведены факты о трансфере и доставке горохом части симбиотически фиксированного азота к корневой системе злакового растения в виде аминокислотного экссудата. Благодаря более высокой усваивающей способности корневой системы зернобобовых культур, в границах ризосферы происходит увеличение подвижности почвенных соединений азота [13, 14] и фосфора [15–17]. В результате существенно облегчается процесс поглощения питательных веществ корневой системой, происходит оптимизация условий минерального питания злакового компонента [18, 19]. Стимулирующее видоспецифическое влияние компонентов смешанных посевов [20–23] отчасти объясняют изменением состава и активности микробного пула ризосферы.

Воздействие злаков на растения из семейства бобовых может быть выражено посредством увеличения их симбиотической фиксации атмосферного N_2 [24, 25]. Данное взаимодействие происходит посредством корневых экссудатов, способных увеличить экспрессию флавоноидов (сигнальных соединений для ризобий) и генов, отвечающих за инфицирование корневой системы бобовых культур со стороны симбиотических микроорганизмов и последующий процесс нодуляции [26].

Ключевая роль в вопросе взаимодействия компонентов смешанных посевов принадлежит азоту. Азот почвы и удобрений является тем питательным ресурсом, благодаря которому комплементарные межвидовые взаимоотношения переходят в конкурентные. Доминирующая роль злаковых компонентов в составе смешанных посевов сводится к более интенсивному поглощению азота почвенных запасов и привнесенных количеств с удобрениями [27–29]. Вопреки такому “агрессивному” поведению злака, бобовый компонент посева отвечает увеличением азотфиксирующей способности на 9–17% [30, 31] для обеспечения собственной потребности в азоте до 95–99% [32, 33].

Внесение азота минеральных удобрений [34] особенно в нитратной форме [35, 36] вносит дополнительные коррективы в механизм образования и последующую работу корневого симбиотического аппарата бобовых. Указывали на снижение скорости и полное ингибирование процесса образования клубеньков (нодуляции), наличие повреждений уже существующих клубеньков, непосредственное уменьшение объемов фиксации азота [35] в одно- и поливидовых посевах бобовых культур. При этом исследователи [37] указали на менее выраженный характер такого влияния на ризобиальный аппарат со стороны азота удобрений именно в смешанных посевах.

Обозначенные критерии и параметры взаимодействия компонентов в составе смешанных бобово-злаковых посевов делают более значимым последующее исследование данного вопроса, подчеркивают их актуальность и позволяют более комплексно подходить к интерпретированию полученных результатов. Цель работы — изучение эффективности азотного удобрения для определения перспективности возделывания смешанных посевов гороха и яровой пшеницы в севообороте.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 2012–2014 гг. на научно-учебном опытном поле Пермского ГАТУ. Почва — дерново-мелкоподзолистая среднесуглинистая, сформированная на покровных пермских глинах. Перед закладкой опыта пахотный слой 0–(24–26 см) имел следующие агрохимические показатели: содержание гумуса (по методу Тюрина в модификации Никитина) — 1.68–1.81%, pH_{KCl} 5.6–6.4, содержание подвижных форм (по Кирсанову) фосфора и калия — 242–401 и 224–340 мг/кг соответственно. Полевой 2-факторный опыт предполагал изучение отзывчивости посева на уровень азотного питания при 3-х соотношениях компонентов в составе бобово-злаковой смеси в сравнении с одновидовыми посевами бобовой (горох, 1.4 млн шт./га) и зерновой (яровая пшеница, 7 млн шт./га) культур по следующей схеме. Фактор *A* — состав посева: A_0 — пшеница 100%, A_1 — пшеница 75% + горох 25%, A_2 — пшеница 50% + горох 50%, A_3 — пшеница 25% + горох 75%, A_4 — горох 100%; фактор *B* — дозы азота: B_0 — N_0 , B_1 — N_{30} , B_2 — N_{60} .

Размер делянок для фактора *A* и *B* составлял 900 и 150 м² соответственно, учетная площадь при уборке — 25.2 м², Повторность в опыте четырехкратная, расположение делянок — по методу систематических повторений. Азотное удобрение (N_m , 46% д.в.), вносили под предпосевную культувацию.

Предшественник — озимая рожь, посеянная после чистого пара. Объекты исследования — районированные сорта гороха посевного (Альбумен) и пшеницы яровой (Иргина), имеющие близкий по продолжительности вегетационный период. Посев и последующие агротехнические мероприятия проводили согласно перспективной технологии заготовки кормов из смесей бобовых и злаковых растений при уборке всей надземной биомассы в фазе молочно-восковой спелости злакового компонента на зерносеяж [38]. Уборку проводили дифференцировано, скашивали косилкой КС-2,1 по достижению культурами уборочной спелости в сочетании с прямым методом учета урожая.

В образцах зерносеяжа определяли содержание сухого вещества (ГОСТ 31640-2012), сырого протеина (ГОСТ 13496.4-93), сырой клетчатки (ГОСТ 31675-2012), сырого жира (ГОСТ 13496.15-2016), сырой золы (ГОСТ 32933-2014). Расчет количества обменной энергии (**ОЭ**, Мдж/кг) и кормовых единиц (**к.е.**, кг/кг) производили согласно [39]. Поступление органического вещества, общего и фиксированного азота в вариантах с одно-

видовыми и смешанными посевами рассчитывали по [40].

Изучение эффективности действия общего и биологического азота, накопленного в составе пожнивно-корневых остатков гороха в вариантах со смешанными и одновидовым посевами, проводили посредством учета урожая зерна ячменя сорта Родник Прикамья, высеваемого в качестве последующей культуры севооборота соответственно с 2013 по 2015 г. Посев и последующие агротехнические мероприятия в опыте производили в соответствии с методикой [41]. При посеве ячменя вносили фосфорное удобрение (P_c , 26% д.в.), в дозе P_{15} . Учет урожая ячменя проводили сплошным методом при уборке комбайном в фазе полной спелости зерна. Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа.

Вегетационный период (май–август) 2012 г. в Пермском крае отличался преобладанием положительной аномалии температуры воздуха на 1–2°C, в отсутствие сильных похолоданий. Сумма осадков на большей части края была около нормы, преобладали осадки конвективного характера. В мае 2013 г. средняя температура воздуха была близка к норме (8–12°C), осадков выпало меньше нормы, они имели в основном ливневый характер. Отмечались регулярные заморозки до –1...–4°C в 1-й и 2-й декадах. Июнь был теплым и сухим, средняя температура воздуха была выше нормы на 2–3°C и соответствовала норме июля. Среднемесячная температура составила 18–21°C. Осадков в крае выпало меньше нормы. Август характеризовался умеренно теплой погодой без резких колебаний температуры. Осадков выпало преимущественно меньше нормы.

Главной особенностью вегетационных периодов 2014–2015 гг. оказалось преобладание прохладной погоды с избытком осадков. Средняя температура воздуха за летний период составила 15.5°C, что было примерно на 1.3°C ниже климатической нормы. В 2014 г. с 10 июля и до конца месяца на Среднем Урале наблюдали аномально холодную погоду с температурой воздуха ниже нормы в среднем на 5–6°C. В 2015 г. средняя температура воздуха в июне составила 18.8°C (на 2.4°C теплее нормы), в июле – 14.7°C (на 3.6°C холоднее нормы), в августе – 13.0°C (на 2.3°C холоднее нормы). Периоды 2014–2015 гг. в Пермском крае были исключительно дождливыми, причем больше всего осадков выпало в основной сельскохозяйственной зоне.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Возделывание смешанных посевов зернобобовых и злаковых культур может иметь дифференцированный [42] и в то же время универсальный характер использования с учетом потребностей животноводства. Гидротермические условия в периоды вегетации обусловили существенные различия в продуктивности одновидовых и смешанных посевов и их отзывчивости на уровни азотного питания в зависимости от года проведения исследования (табл. 1). Большой пластичностью к условиям возделывания среди изученных видов характеризовалась яровая пшеница. Без азотного удобрения урожайность ее зерносеменной массы по годам составила 6.01–7.60 т/га. Горох при тех же равных условиях формировал урожайность на уровне 5.34–6.63 т/га. Вегетационный период 2012 г. отличался более высокой урожайностью бобовой культуры, в остальные годы (2013–2014 гг.), достоверно выше была урожайность яровой пшеницы. Для смешанных посевов характерным был более высокий уровень урожайности относительно одновидовых посевов во все годы исследования. Более существенные отличия зафиксированы в 2012 г. Увеличение уровня азотного питания в годы проведения исследования и в среднем за 3 года было условием повышения и соответствующего дифференцирования урожайности посевов.

В 2012 г. отмечено существенное увеличение урожайности зерносеменной массы от 4.99–5.61 до 7.14–7.76 т/га (относительно одновидовых посевов) при включении в состав посевов посевного гороха в долевом эквиваленте, равном 50 и 75% соответственно. При внесении N_{30} урожайность увеличивалась на 0.97 т/га. При дальнейшем повышении уровня азотного питания увеличение урожайности отмечали на уровне тенденции.

Отзывчивость одновидовых посевов пшеницы и гороха на использование азотного удобрения в дозах 30 и 60 кг/га составила 1.20–1.68 и 0.37–1.20 т/га соответственно. Высокая отзывчивость злакового компонента на использование азота удобрений обусловлена биологическими особенностями развития культуры и зачастую выступает в качестве фактора, лимитирующего уровень ее продуктивности на дерново-подзолистых почвах Предуралья [43].

Более высокая урожайность смешанных посевов получена при равном соотношении компонентов (пшеница 50% + горох 50%) и преобладании гороха (пшеница 25% + горох 75%) в смеси. Для условий Предуралья установлено преимущество внесения N_{60} . В этом случае наблюдали

Таблица 1. Урожайность зерносенажной массы одновидовых и смешанных посевов пшеницы и гороха, т/га

Состав посева (фактор А)	Дозы азота (фактор Б)			Среднее фактора А
	N0	N30	N60	
2012 г.				
Пшеница 100%	5.05	6.25	6.73	6.0
Пшеница 75% + горох 25%	6.54	7.05	7.28	7.0
Пшеница 50% + горох 50%	10.5	11.8	12.5	11.6
Пшеница 25% + горох 75%	11.3	12.8	14.2	12.8
Горох 100%	6.11	6.48	7.31	6.6
Среднее фактора Б (HCP_{05} главных эффектов = 0.74)	7.90	8.87	9.60	HCP_{05} главных эффектов = 1.5
HCP_{05} частных различий фактора	А			2.6
	Б			1.6
2013 г.				
Пшеница 100%	5.72	6.24	7.14	6.37
Пшеница 75% + горох 25%	6.06	7.65	8.35	7.35
Пшеница 50% + горох 50%	6.41	7.79	9.29	7.83
Пшеница 25% + горох 75%	7.57	9.17	10.9	9.20
Горох 100%	4.45	5.18	6.39	5.34
Среднее фактора Б (HCP_{05} главных эффектов = 0.37)	6.04	7.21	8.41	HCP_{05} главных эффектов = 0.87
HCP_{05} частных различий фактора	А			1.5
	Б			0.8
2014 г.				
Пшеница 100%	6.85	7.03	8.92	7.60
Пшеница 75% + горох 25%	8.07	8.10	9.52	8.56
Пшеница 50% + горох 50%	8.16	9.33	10.8	9.42
Пшеница 25% + горох 75%	8.64	9.47	10.4	9.45
Горох 100%	5.36	6.16	7.48	6.33
Среднее фактора Б (HCP_{05} главных эффектов = 0.54)	7.42	8.02	9.38	HCP_{05} главных эффектов = 0.91
HCP_{05} частных различий фактора	А			1.6
	Б			1.2
Среднее (2012–2014 гг.)				
Пшеница 100%	5.87	6.51	7.60	6.66
Пшеница 75% + горох 25%	6.89	7.60	8.38	7.62
Пшеница 50% + горох 50%	8.35	9.65	10.84	9.61
Пшеница 25% + горох 75%	9.18	10.80	12.11	10.70
Горох 100%	5.31	5.94	7.06	6.10
Среднее фактора Б (HCP_{05} главных эффектов = 0.35)	7.1	8.1	9.2	HCP_{05} главных эффектов = 2.3
HCP_{05} частных различий фактора	А			4.0
	Б			0.78

формирование более высокорослых и облиственных растений, прежде всего – бобовой культуры.

Увеличение доли зернобобового компонента в составе смешанных посевов с 25 до 50 и до 75% приводило к повышению их отзывчивости при уровне азотного питания N30 с 0.51 до 1.37 и 1.41 т/га, N60 – с 0.74 до 1.99 и 2.89 т/га соответственно. Это было связано со снижением видовой конкуренции между культурами относительно использования доступного количества азота почвы и удобрений [44, 45], которую наблюдали благодаря снижению доли злакового компонента в составе посева при последующих переводе и выстраивании взаимоотношений между видами культур по типу протокооперации на основании принципов комплементарности [46, 47].

Существенное увеличение урожайности зерносенажной массы от 0.99–2.01 до 3.50–4.53 т/га (относительно одновидовых посевов) зафиксировано в 2013 г. при включении в состав посевов злакового компонента. Более высокая урожайность (9.20 т/га) получена в смешанном посеве с преобладанием бобового компонента (пшеница 25% + горох 75%). При внесении N30 и N60 происходило увеличение зерносенажной массы на 1.16 и 2.37 т/га соответственно. Существенная разница урожайности между фоном N0 и вариантами с внесением N30 (1.38–1.60 т/га) зафиксирована только в смешанных посевах. Это могло быть связано с более интенсивным потреблением и использованием растениями азота удобрения.

Современные сорта посевного гороха в процессе вегетации достаточно эффективно используют азот почвы и минеральных удобрений. При этом отмечен частичный или даже полный отказ представителей данного семейства от симбиотрофного типа питания азотом атмосферы [48], что в последующем негативно отражается на азотном балансе почвы и делает менее привлекательным включение одновидовых и смешанных посевов гороха в состав севооборотов. Азот минеральных удобрений (особенно в нитратной форме) уже через 7 ч способен оказывать ингибирующее действие на развитие симбиотического ризобияльного аппарата бобовых культур [49]. По данным [50, 51], на последующем этапе развития представители семейства бобовых могут самостоятельно регулировать количество клубеньков на корнях и степень развития ризосферных симбионтов в зависимости от обеспеченности почвы доступными для питания формами азота и характера взаимоотношений, прежде всего, степени проявления конкуренции, в рамках одновидовых и смешанных посевов.

Более высокая урожайность зерносенажа (7.57 т/га) на фоне N0 (относительно одновидового посева пшеницы) была получена в варианте с преобладанием бобового компонента в составе смеси. С увеличением уровня азотного питания урожайность смесей существенно возрастала только при равном соотношении компонентов (пшеница 50% + горох 50%) и преобладании бобового компонента (пшеница 25% + горох 75%). Увеличение доли зернобобового компонента в составе смешанных посевов с 25 до 50 и до 75% привело к росту прибавки урожайности: при применении N30 с 1.59 до 1.38 и 2.60 т/га, N60 – с 2.29 до 2.88 и 4.30 т/га соответственно. Преимущество смешанных посевов относительно одновидовых посевов этих культур в отношении использования элементов питания из удобрений отмечено при обоих уровнях (N30, N60) азотного питания. В подтверждение полученных данных можно привести результаты исследования [52], где указано на более интенсивное (в 1.88–2.76 раза) поглощение азота пшеницей и викой в смешанных посевах на протяжении всего периода вегетации относительно одновидовых посевов. Более высокий эффект от сочетания компонентов получен при соотношении пшеница 25% + горох 75% и внесении азота в дозе N60.

В 2014 г. преимущество имели смешанные посевы пшеницы и гороха. Существенное увеличение урожайности зерносенажной массы от 0.96–1.85 до 2.23–3.12 т/га отмечали при всех изученных соотношениях компонентов в составе высеваемых смесей. При внесении N30 происходило увеличение зерносенажной массы на 0.60 т/га, последующее увеличение дозы до N60 обеспечивало дальнейший рост урожайности на 1.36 т/га. Аналогичная тенденция и более высокая отзывчивость на уровне азотного питания была получена только при равном соотношении компонентов (пшеница 50% + горох 50%) в составе высеваемой смеси. Сформированный смешанный посев с указанным составом компонентов отличался последовательной увеличивающейся отзывчивостью на возрастающие дозы азотного удобрения (прибавка при применении N30 составила +1.17, N60 – +1.43 т/га).

Это указывало на более полную реализацию биологического потенциала культур с точки зрения потребления элементов питания (прежде всего азота) из почвы и внесенного удобрения при соответствующем соотношении видов в составе высеваемой смеси. Такое долевое сочетание компонентов при близких сроках прохождения фенологических фаз развития и интенсивности роста использованных сортов культур в посеве способ-

ствовало межвидовому взаимодействию, позволившему полноценно развиваться растениям обоих видов.

Более высокая урожайность смеси относительно одновидового посева пшеницы без N-удобрения получена при преобладании бобового компонента в составе смеси (пшеница 25% + горох 75%). Увеличение уровня азотного питания (N30), способствовало получению существенных прибавок урожайности зерносеменной массы смеси с равным соотношением культур (пшеница 50% + горох 50%) и преобладанием бобового компонента (пшеница 25% + горох 75%). На более высоком уровне азотного питания (N60) существенная прибавка урожайности (1.84 т/га) получена при равном соотношении высеваемых культур (пшеница 50% + горох 50%). Существенное увеличение урожайности на 1.45–2.60 т/га всех вариантов смешанных посевов отмечено только на более высоком уровне азотного питания (N60). На основании фенологических наблюдений в 2014 г. зафиксировано существенное удлинение межфазных периодов и затягивание момента перехода к развитию генеративных органов растений.

В среднем за 3 года исследования варьирование урожайности зерносеменной массы смешанных посевов составило 0.79–1.64 т/га, что объясняется отличиями гидротермических условий годов опыта. По урожайности смешанные посевы существенно превосходили одновидовые посевы этих культур.

В среднем за годы исследования за счет возрастания доли семян гороха с 25 до 50 и 75% в посевной норме происходило увеличение урожайности зерносеменной массы на 0.97, 2.95 и 4.04 т/га соответственно. Существенными были различия прибавки урожайности только при увеличении доли бобового компонента в смеси >50%. Увеличение доз азота (N0→N30→N60) сопровождалось выраженным положительным действием во все годы исследования. В среднем за 3 года уровень прибавки составил соответственно 0.98 и 2.08 т/га. Проявление принципов комплементарности между компонентами смешанных посевов пшеницы и гороха было связано не только с развитием корневых систем, но и архитектурой надземной массы. Прочная соломина, а в последующем и колос яровой пшеницы выполняли роль поддерживающего компонента, благодаря которому происходило четкое вертикальное ориентирование стеблей гороха. Это позволило бобовому компоненту в последующем занять максимальное количество свободного межрядового пространства в посевах, тем самым обеспечить большую ассимилирующую поверхность листового

аппарата. Учитывая совокупность воздействия изученных факторов, следует отметить, что максимальная урожайность в среднем за 3 года (12.1 т/га) получена при возделывании пшеницы и гороха в смеси (пшеница 25% + горох 75%) на фоне N60. Созданный фон азотного питания определял сбалансированность питания культур в одновидовых посевах, снижение напряженности во взаимодействии и конкурентных отношениях между видами в смешанных посевах.

Перечень показателей качества урожая (табл. 2, 3) продиктован характером использования корма и принципами, на основании которых происходит составление рационов для высокопродуктивных сельскохозяйственных животных и птицы [53, 54].

Зерносеменная масса, полученная в одновидовых посевах, существенно отличалась по большинству представленных показателей. Корм, полученный в смешанных посевах, чаще занимал промежуточное положение, которое определяло соотношение видов культур в составе высеваемой смеси.

В зерносеменной массе, полученной в смешанных посевах яровой пшеницы и посевного гороха, содержание сырого протеина было на уровне 89.8–149 г/кг. Более высокие показатели (139–149 г/кг корма) были характерны для смешанных посевов с соотношением компонентов пшеница 25% + горох 75%. Полученный корм соответствовал 1-му классу (не менее 120 г/кг). Биологические особенности развития зернобобовых культур предусматривают накопление и более высокое содержание азотсодержащих соединений в составе не только зерна, но и вегетативных органов (стеблей, листьев, побегов) растений.

Смешанные посевы имели преимущество над одновидовыми посевами пшеницы при равном сочетании компонентов (пшеница 50% + горох 50%) и большей доли гороха в составе высеваемой смеси (пшеница 25% + горох 75%). Преимущество среди изученных посевов по уровню содержания сырого протеина (145 г/кг – 1-й класс), имел посев с преобладанием бобовой культуры в составе высеваемой смеси. Устойчивая тенденция к повышению содержания сырого протеина (118→124→128 г/кг) зафиксирована при увеличении уровня азотного питания (N0→N30→N60). Существенное увеличение содержания сырого протеина на 9.7 г/кг (до уровня 1-го класса), происходило только при внесении N60.

Структурность и переваримость зерносеменного, а также степень расщепления полимерных углеводистых соединений в его составе определяются

Таблица 2. Содержание сырого протеина и сырой клетчатки в зерносенаже, г/кг сухого вещества (среднее за 2012–2014 гг.)

Соотношение компонентов смеси (фактор А)	Дозы азота (фактор В)			Среднее фактора А (НСР ₀₅ главных эффектов = 24/34)
	N0	N30	N60	
Пшеница 100%	77/303	82/290	92/307	83/300
Пшеница 75% + горох 25%	90/267	98/258	105/257	98/260
Пшеница 50% + горох 50%	107/259	114/275	113/266	111/267
Пшеница 25% + горох 75%	139/248	148/263	149/271	145/261
Горох 100%	178/230	180/239	182/248	180/239
Среднее фактора В, (НСР ₀₅ главных эффектов = 9.5/15)	118/261	124/265	128/270	
НСР ₀₅ частных различий фактора		А		42/59
		В		21/34
Нормы для зерносенажа 1 / 2 / 3 класса по ГОСТ Р 58145-2018	сырого протеина, не менее 120/100/80			сырой клетчатки, не более 250/270/290

Примечание. Над чертой – содержание сырого протеина, под чертой – содержание сырой клетчатки.

Таблица 3. Содержание сырого жира и сырой золы в зерносенаже, г/кг сухого вещества (среднее за 2012–2014 гг.)

Соотношение компонентов смеси (фактор А)	Дозы азота (фактор В)			Среднее фактора А (НСР ₀₅ главных эффектов = 8.3/7.0)
	N0	N30	N60	
Пшеница 100%	14.7/18.7	17.5/19.4	16.9/20.7	16.3/19.6
Пшеница 75% + горох 25%	20.4/28.3	22.7/26.3	18.7/27.7	20.6/27.5
Пшеница 50% + горох 50%	23.6/35.7	22.3/37.3	20.5/37.4	22.2/36.8
Пшеница 25% + горох 75%	28.1/42.4	25.9/46.4	25.5/41.0	26.5/43.3
Горох 100%	26.1/45.1	27.0/50.0	29.6/53.7	27.6/49.6
Среднее фактора В (НСР ₀₅ главных эффектов = 2.2/3.3)	22.6/34.0	23.1/35.9	22.2/36.1	
НСР ₀₅ частных различий фактору		А		14.5/12.0
		В		5.0/7.3
Нормы для зерносенажа 1/2/3 класса по ГОСТ Р 58145-2018	Содержание сырого жира не нормируется			Содержание сырой золы ≥60/80/100

Примечание. Над чертой – содержание сырого жира, под чертой – содержание сырой золы.

содержанием сырой клетчатки. Ее накопление по мере созревания зерновых культур ограничивает проведение уборки на зерносенаж в более поздние сроки, отличающиеся накоплением большего количества сухого вещества [53].

В зерносенажной массе, полученной в смешанных посевах яровой пшеницы и посевного гороха, содержание сырой клетчатки было на уровне 248–275 г/кг. Более низкие показатели (248 г/кг корма) были получены в смешанном посеве пшеница 25% + горох 75% без внесения N-удобрения. Включение и последующее увеличение доли гороха в составе смешанных посевов способствовало снижению количества сырой

клетчатки в зерносенажной массе, что положительно отражается на переваримости корма [53].

Зерносенажная масса, полученная в смешанных посевах с преобладанием одного из компонентов в составе высеваемой смеси (пшеница 75% + горох 25%, пшеница 25% + горох 75%), по содержанию сырой клетчатки соответствовала 2-му классу. Ключевым условием, наряду с включением гороха, для этого являлось снижение количества солоистой части растений пшеницы в общем объеме полученной зерносенажной массы. Повышение содержания сырой клетчатки (261→265→270 г/кг) при увеличении уровня азотного питания можно рассматривать на уровне тенденции.

Таблица 4. Содержание обменной энергии (МДж/кг сухого вещества) и кормовых единиц (кг/кг сухого вещества) в зерносенаже (среднее за 2012–2014 гг.)

Соотношение компонентов смеси (фактор А)	Дозы азота (фактор В)			Среднее фактора А (НСР ₀₅ главных эффектов = 0.57/0.08)
	N0	N30	N60	
Пшеница 100%	7.97/0.51	8.12/0.53	8.26/0.55	8.12/0.53
Пшеница 75% + горох 25%	8.35/0.57	8.56/0.60	8.69/0.61	8.53/0.59
Пшеница 50% + горох 50%	8.73/0.62	8.83/0.63	8.82/0.63	8.79/0.63
Пшеница 25% + горох 75%	9.43/0.72	9.57/0.74	9.54/0.74	9.51/0.74
Горох 100%	10.3/0.86	10.3/0.86	10.3/0.86	10.3/0.86
Среднее фактора В (НСР ₀₅ главных эффектов = 0.21/0.03)	8.96/0.66	9.07/0.67	9.12/0.68	
НСР ₀₅ частных различий фактора		А В		0.99/0.14 0.47/0.07
Нормативные требования оценки питательности корма 1/2/3 класса, для 1 кг сухого вещества		обменной энергии ≥9.20/8.60/8.10		кормовых единиц ≥0.69/0.60/0.53

Примечание. Над чертой – содержание обменной энергии, под чертой – содержание кормовых единиц.

Содержание сырого жира в зерносенаже (табл. 3) в зависимости от состава смешанных посевов и уровня азотного питания варьировало в пределах от 10.8–91.4 до 5.5–19.1% соответственно. Двухкомпонентные посевы имели преимущество относительно одновидового посева пшеницы только в случае преобладания доли гороха в составе высеваемой смеси (пшеница 25% + горох 75%).

Содержание сырой золы входит в перечень ключевых показателей, которые определяют классность зерносенажа по ГОСТ Р 58145-2018 “Зерносенаж. Технические условия”. Более высокое содержание сырой золы в зерносенажной массе было в одновидовом и смешанном посеве бобовой культуры, поскольку зерновые бобовые культуры больше потребляют элементов минерального питания по сравнению со злаковыми [55]. Преимущество среди изученных смесей по содержанию сырой золы (36.8 и 43.3 г/кг, 1-й класс), имели посевы с сочетанием пшеница 50% + + горох 50% и пшеница 25% + горох 75%. Содержание сырой золы в зерносенаже смешанных посевов не изменялось в зависимости от состава посева и уровня азотного питания и соответствовало норме для 1-го класса (≤60 г/кг). Данная особенность была связана с тем, что однолетние злаковые и бобовые культуры относительно многолетних представителей своих видов отличаются более низким содержанием минеральных соединений в своем составе [53].

Возделывание смешанных посевов гороха в севооборотах позволяет увеличить накопление

энергии и выход кормовых единиц (к.е.) с урожаем за счет повышения урожайности и валового сбора, увеличения общей питательности и оптимизации биохимического состава корма. Обменная энергия (ОЭ) считается основной частью перевариваемой энергии, заключенной в корме, которая становится доступной животным для использования в процессе обмена веществ [53]. Согласно [39], для ее расчета используют уравнение, в котором применяют показатели, отражающие содержание сырой клетчатки и сырого протеина.

Зерносенажная масса, полученная в одновидовых посевах пшеницы и гороха, существенно отличается по величине обменной энергии и количеству кормовых единиц (табл. 4). На основании главных эффектов разница в содержании обменной энергии в составе зерносенажной массы горохового посева составила +2.18 МДж/кг или +0.33 кг к.е./кг. Для частных различий в зависимости от уровня азотного питания величины прибавок составили +2.34 (N0), +2.17 (N30) и +2.04 (N60) МДж/кг сухого вещества корма или +0.35 (N0), +0.32 (N30) и +0.31 (N60) кг к.е./кг сухого вещества корма. В зерносенаже одновидового посева гороха количество обменной энергии не изменялось (10.3 МДж/кг) в зависимости от доз азота, в посеве яровой пшеницы отмечена тенденция к повышению содержания обменной энергии (с 7.97 до 8.12 и 8.26 МДж/кг) в полученной зерносенажной массе при увеличении уровня азотного питания.

За счет увеличения доли гороха зафиксировано более высокое содержание обменной энергии

(+1.28–1.45 МДж/кг) и кормовых единиц (+0.19–0.21 кг) относительно одновидового посева пшеницы в зерносенаже смешанного посева (пшеница 25% + горох 75%, 1-й класс) независимо от уровня азотного питания. Повышение содержания обменной энергии (8.96→9.07→9.12 МДж/кг) и количества кормовых единиц (0.66→0.67→0.68 кг/кг) при увеличении уровня азотного питания можно рассматривать только на уровне слабой тенденции к росту.

Зерносенаж, полученный в смешанных посевах, значительно отличался и превосходил по биохимическому составу и питательности корм одновидового посева яровой пшеницы. При преобладании пшеницы в составе высеваемой смеси (пшеница 75% + горох 25%) полученный зерносенаж по абсолютному большинству нормируемых показателей, согласно ГОСТ Р 58145-2018, соответствовал только 3-му классу. Исключение составил вариант с внесением N60: зерносенаж по всем показателям соответствовал более высокому 2-му классу.

При равном долевым соотношении компонентов смеси (пшеница 50% + горох 50%) получен зерносенаж, соответствующий 2-му классу. Исключение составил вариант с внесением N30: зерносенаж соответствовал только 3-му классу ввиду превышения количества сырой клетчатки (>270 г/кг) в составе корма. Дальнейшее увеличение доли гороха в составе посева до 75% определяло увеличение количества протеинового компонента и общей питательности корма. По абсолютному большинству нормируемых показателей (сырой протеин, сырая зола, количество обменной энергии и кормовых единиц) полученный зерносенаж соответствовал 1-му классу. Лимитирующим показателем для корма в данном варианте служило содержание сырой клетчатки: для отнесения корма к 1-му классу ее содержание не должно превышать 250 г/кг. Данному пороговому показателю и соответственно полному удовлетворению всей совокупности требований, предъявляемых для зерносенажа 1-го класса, согласно ГОСТ Р 58145-2018, соответствовал корм, полученный без внесения азотного удобрения.

Бобовые культуры обладают уникальной способностью в симбиозе с клубеньковыми бактериями фиксировать азот атмосферы и переводить его в доступные для растений соединения [40, 56]. Они обогащают почву азотом, действие которого проявляется в течение 2–3-х лет. За счет растительных остатков бобовых культур происходит обогащение почвы свежим органическим веществом, по химическому составу наиболее полно

удовлетворяющим условиям интенсивной гумификации и минерализации.

Накопление общего количества N в составе урожая напрямую зависело от продуктивности посевов и содержания азота в составе зерносенажа (табл. 5). В свою очередь, величины данных параметров были связаны с соотношением отдельных компонентов в составе посева и уровнем азотного питания.

В составе урожая посева с преобладанием пшеницы (пшеница 75% + горох 25%) накопление общего азота на 29.9–34.7% было обеспечено за счет бобового компонента. Увеличение доли гороха в составе высеваемых смесей до 50 и 75% способствовало наращиванию количества азота, полученного за счет гороха, до 55.4–58.3 и 63.0–67.3% соответственно. Вынос азота урожаем зерносенажной массы в одновидовом посева составил 68.1–92.6 кг/га и четко зависел от уровня азотного питания.

За счет включения гороха в состав посевов с пшеницей после уборки соответствующих посевов в почву поступало 16.0–19.5 (пшеница 75% + горох 25%), 38.7–50.3 (пшеница 50% + горох 50%) и 63.9–84.3 (пшеница 25% + горох 75%) кг азота/га. Большая часть общего азота ко времени уборки урожая на зерносенаж была накоплена в надземной вегетативной массе растений. Например, в вариантах со смешанными посевами соотношение между количеством азота, накопленного в урожае зерносенажа и в составе ПКО, составило 1.02–1.27. В вариантах с одновидовым посевом гороха наблюдали обратную закономерность: 0.92–0.94. В вариантах со смешанными посевами общее количество азота в составе биомассы гороха была представлено равными долями между надземной убираемой частью урожая и массой корневых систем с сопряженной с ними частью соломы.

В зависимости от урожайности и состава горохо-пшеничные смеси накапливали общего азота от 44 до 130 кг/га в вегетативной массе и 46–101 кг/га – в пожнивно-корневых остатках, суммарное содержание симбиотического азота в них было равно 20–108 кг/га. В пожнивно-корневых остатках гороха при возделывании его в составе горохо-пшеничных смесей накапливалось меньшее количество симбиотического азота – от 10.4 до 54.8 кг/га. Следует отметить, что одновидовой посев гороха по количеству общего азота значительно (на 7.4–13.8 кг/га) превосходил вариант со смесью пшеница 25% + горох 75%. По накоплению фиксированного азота воздуха данные ва-

Таблица 5. Вклад биологического азота растений гороха в азотный баланс при его возделывании в составе горохо-пшеничных смесей и одновидового посева на зерносеяж в зависимости от уровня азотного питания (среднее за 2012–2014 гг.)

Показатель	Состав посева											
	пшеница 75% + + горох 25%			пшеница 50% + + горох 50%			пшеница 25% + + горох 75%			горох 100%		
	N0	N30	N60	N0	N30	N60	N0	N30	N60	N0	N30	N60
Урожайность, т/га	3.10	3.42	3.77	3.76	4.34	4.88	4.13	4.86	5.45	2.39	2.67	3.18
Выход пожнивно-корневых остатков (ПКО), т/га	3.33	3.67	4.05	4.04	4.67	5.24	4.44	5.22	5.86	2.57	2.87	3.41
в т.ч. за счет гороха	0.83	0.92	1.01	2.02	2.33	2.62	3.33	3.91	4.39			
Накопление общего N, кг/га												
В урожае	44.5	53.7	63.1	64.4	79.4	88.0	92.1	114.9	129.8	68.1	76.8	92.6
в т.ч. за счет гороха	15.5	17.1	18.9	37.6	43.4	48.8	62.0	72.9	81.8			
В составе ПКО	46.0	50.7	55.9	63.0	72.8	81.7	77.3	90.8	102	73.8	82.6	98.2
в т.ч. в ПКО гороха	16.0	17.6	19.5	38.7	44.8	50.3	63.9	75.2	84.3			
В биомассе гороха	31.5	34.7	38.3	76.3	88.2	99.1	126	148	166	142	159	191
Накопление фиксированного N, кг/га												
В биомассе гороха	20.5	22.6	24.9	49.6	57.4	64.4	81.8	96.2	108	76.3	85.8	103
в т.ч. в ПКО	10.4	11.5	12.6	25.2	29.1	32.7	41.6	48.9	54.8	32.0	35.8	42.6
Накопление органического С, кг/га												
В урожае	1400	1540	700	1690	1950	2190	1860	2190	2450	1070	1200	1430
Поступило в почву с ПКО	1540	1700	1870	1900	2200	2470	2130	2500	2810	1250	1400	1670
в т.ч. за счет гороха	406	448	495	985	1140	1280	1630	1910	2140			
Отношение С : N в составе ПКО	33.5			30.2			27.5			25.4		

рианты имели близкие показатели: 42.1–56.0 и 41.6–54.8 кг N/га соответственно.

В смешанном посеве с минимальной долей гороха (25%) величина накопления биологического азота была соразмерна внесению N_{aa} в дозе 30–35 кг/га, при равных долях компонентов смеси (50% + 50%) – соответственно 73–95 кг/га. В посеве с преобладанием гороха (пшеница 25% + горох 75%) и в его одновидовом посеве этот показатель достигал 120–160 кг/га. Указанное количество биологического азота соответствовало минимальной рекомендуемой дозе N_{aa} при возделывании яровых зерновых культур в Предуралье [41].

Учитывая, что 25% от накопленного $N_{биол}$ усваивается последующей культурой севооборота, можно рассчитать величину возможной прибавки, получаемой при возделывании яровой зерновой культуры в севообороте, где в качестве предшественника были смешанные и одновидовой посев гороха (табл. 6). При размещении в севообороте в качестве последующей культуры ярового ячменя, у которого вынос азота 1 т зерна с соответствующим количеством соломы составил

бы 29 кг, величины прибавок урожайности составят от 0.10 до 0.48 т/га. Полученные расчетные величины прибавок урожайности зерна напрямую зависели от доли гороха в составе смешанного посева, урожайности посева и условий азотного питания. Исследование [57] показало, что возделывание зернобобовых в севообороте позволяло сократить внесение азотных минеральных удобрений под основные культуры на 15–20% без ущерба для их продуктивности, а также полностью исключить их применение под зернобобовые культуры.

Ключевым критерием, наряду с содержанием общего азота, определяющим скорость разложения, последующую минерализацию и качество образующегося в почве органического вещества, является соотношение углерода к азоту (С : N). Органическую массу пожнивно-корневых остатков (ПКО) в которой содержание общего азота в расчете на абсолютно сухую массу превышало 2% (пшеница 25% + горох 75%, горох 100%), а соотношение углерода к азоту (С : N) не превышало 20, можно вносить и заделывать под любую культуру без риска проявления азотного голодания растений. Чем уже соотношение С : N и больше

Таблица 6. Расчетное количество усвоенного $N_{\text{биол}}$ и величины прибавок урожайности ярового ячменя (среднее за 2012–2014 гг.)

Соотношение компонентов смеси (фактор А)	Количество усвоенного $N_{\text{биол}}$, кг/га			Величина прибавок урожайности, т/га		
	N0	N30	N60	N0	N30	N60
Пшеница 75% + горох 25%	2.6	2.9	3.2	0.09	0.10	0.11
Пшеница 50% + горох 50%	6.3	7.3	8.2	0.22	0.25	0.28
Пшеница 25% + горох 75%	10.4	12.2	13.7	0.36	0.42	0.47
Горох 100%	10.5	11.8	14.0	0.36	0.41	0.48

Таблица 7. Влияние биологического азота гороха, возделываемого в составе одновидового и смешанных посевов на урожайность последующей культуры севооборота – ячменя (среднее за 3 года), т/га

Вид предшественника (фактор А)	Дозы азота под предшественник (фактор В)			Среднее фактора А (HCP_{05} главных эффектов = 0.17)
	N0	N30	N60	
Пшеница 100%	2.15	2.27	2.33	2.25
Пшеница 75% + горох 25%	2.48	2.39	2.47	2.43
Пшеница 50% + горох 50%	2.78	2.82	2.80	2.80
Пшеница 25% + горох 75%	2.86	2.86	2.70	2.81
Горох 100%	3.07	3.00	2.91	2.99
Среднее фактора В (HCP_{05} главных эффектов = 0.10)	2.67	2.67	2.65	
HCP_{05} частных различий фактора	А		0.29	
	В		0.22	

азота в составе ПКО, тем выше их удобрительная способность, и наоборот. Если в остающихся в поле ПКО и соломе соотношение С : N шире, чем 20, и содержание N < 2.0%, то использование такой органической массы при заправке под яровые зерновые культуры может способствовать снижению урожайности вследствие потребления запасов азота почвы микроорганизмами, поскольку скорость минерализации фитомассы снижается по мере увеличения внесенного количества ПКО и при обратной зависимости с соотношением С : N [58].

Количество поступившего в почву углерода с ПКО в большей степени зависело от урожайности зерносеянной массы. Объемы поступления > 2 т С/га зафиксированы в смешанных посевах с равными долями компонентов (пшеница 50% + горох 50%) и преобладании гороха (пшеница 25% + горох 75%) в составе высеваемой смеси. При увеличении доли гороха в посевной норме > 50% отмечено более высокое содержание азота (> 2%) в составе зерносеянной массы, за счет чего достигалось более узкое соотношение С : N = 25.4–27.5. Соотношение С : N, обусловленное прежде всего содержанием общего азота в составе фитомассы, является наиболее употребляемым показателем качества поступающих в почву рас-

тительных остатков, характеризующих их способность к разложению [59, 60]. Установлен “чистый эффект” фиксации N_2 зернобобовыми культурами в балансе азота почвы, т.е. разницу между фиксированным азотом воздуха и азотом, накопленным в зерне бобовых культур. Для гороха изменения этого показателя отмечены в достаточно широком интервале от 46 до 181 кг N/га. Было подсчитано, что вклад азота, минерализованного из остатков гороха, в средней урожайности зерна следующей культуры севооборота (пшеницы), составлял порядка 15–30% [61].

Таким образом, показано, что с помощью только биологической азотфиксации нельзя полностью восполнить вынос азота из почвы урожаями сельскохозяйственных культур и его потери от вымывания, иммобилизации и денитрификации. Однако частичная замена азота, используемого для формирования урожая и внесенного с минеральными удобрениями или минерализованного из запасов органического вещества почвы, за счет фиксированного азота вполне возможна.

Полноценное включение смешанных посевов посевного гороха в состав севооборотов подразумевает обязательную их оценку в качестве предшественника (табл. 7). Благодаря заправке горо-

ховой соломы совместно с ПКО, отличающимися более высоким содержанием азота и других элементов минерального питания в своем составе, отмечены значительные изменения в уровне урожайности последующей культуры севооборота. В среднем за 3 года опыта прослежены схожие закономерности с результатами, полученными в отдельные годы исследования. При размещении ячменя после смешанных посевов гороха прибавка урожайности зерна составила 0.18–0.56 т/га, после одновидового посева зернобобовой культуры – 0.74 т/га.

Полученный уровень фактической прибавки урожайности ячменя несколько превышал расчетные величины за счет симбиотически фиксированного азота (табл. 6). Это можно объяснить изменением биохимического состава пшеницы в составе смешанных посевов с горохом. Изменения претерпевало не только зерно, но и вегетативная масса растений, что в последующем могло быть дополнительным источником азота в общем объеме ПКО, благодаря чему отчасти и происходило сужение соотношения С : N в составе послеуборочных остатков.

Рассматривая влияние вида предшественника на уровень урожайности ячменя, особого внимания заслуживает показатель увеличения доли гороха в составе смешанных посевов. Повышение урожайности прежде всего было связано с увеличением количества поступающих в почву ПКО с более высоким содержанием в них азота. Сопутствующими факторами были увеличение видового разнообразия в микробном сообществе сапротрофных организмов ризосферы, улучшение структурности и влагообеспеченности почвы, накопление в прикорневой зоне биогенных элементов, активно извлекаемых из почвы за счет более высокой усваивающей способности корневой системы гороха.

Вид культуры в одновидовых посевах и количественное соотношение компонентов в составе смесей, использованных в качестве предшественника, определяло степень отзывчивости посевов ярового ячменя на созданные ранее уровни азотного питания. При рассмотрении эффективности каждого из посевов с включением гороха в качестве предшественника в отдельности, необходимо выделить достаточно высокий уровень урожайности ячменя на фоне без внесения азота. Существенная прибавка урожайности (+0.33–0.92 т/га) относительно одновидового посева пшеницы на фоне N0 получена после любого из изученных смешанных посевов с участием гороха. В данных условиях отмечено планомерное развитие растений бобового компонента и их симбиотического

ризобиального аппарата, происходило выделение и последующая иммобилизация достаточного количества органических соединений за счет экзосмоса в ризосфере. При применении N30 и N60 увеличение урожайности зерна ячменя наблюдали только в вариантах с равными посевными долями культур (пшеница 50% + горох 50%) и при последующем увеличении доли гороха (до 75% и 100%) в составе смешанных посевов. Высокий уровень урожайности ячменя при внесении под предшественник N30 был получен за счет значительного увеличения продуктивности самих смешанных посевов, а также поступления ПКО. При последующем увеличении обеспеченности почвы азотом (N60) в смешанных посевах пшеница 50% + горох 50% и пшеница 25% + горох 75% наблюдали тенденцию к снижению урожайности. Это было обусловлено определенным ингибирующим действием минерального азота, которое снижало степень нодуляции и симбиотической активности азотфиксирующих микроорганизмов, инфицирующих корневую систему гороха на начальных этапах вегетации, а также замедлением развития и последующего эффективного функционирования симбиотического аппарата бобового компонента в посевах.

Эффективность азота, внесенного с удобрением под предшественник, была обусловлена его “прямым” влиянием, т.е. накоплением в почве (закреплением и последующей реминерализацией) и “косвенным” последствием, связанным с увеличением продуктивности предшествующих культур в севообороте, накоплением послеуборочных остатков, поступлением в почву органического вещества и азота, а также их соответствием классическим для этого условиям (содержание $N_{\text{общ.}} > 2\%$, отношение $C : N \leq 20-24$). Результаты проведенной оценки смешанных посевов в качестве предшественника убедительно свидетельствовали, что использование минерального азота удобрений снижало эффективность включения и последующего увеличения доли гороха в составе смешанного посева с яровой пшеницей.

ВЫВОДЫ

1. Смешанные посевы гороха и пшеницы по величине урожайности зерносенажной массы превосходили одновидовые посевы пшеницы и гороха. За счет увеличения доли гороха с 25 до 50 и 75% в составе высеваемой смеси происходило увеличение урожайности зерносенажной массы на 0.97, 2.95 и 4.04 т/га соответственно. Увеличение уровня азотного питания (N0→N30→N60)

сопровождалось изменением продуктивности посевов на 0.98 и 2.08 т/га.

2. Более высокое содержание сырого протеина в зерносенажной массе (139–149 г/кг корма), было характерно при соотношении компонентов смеси: пшеница 25% + горох 75%. Полученный корм соответствовал 1-му классу (не менее 120 г/кг).

3. Увеличение доли гороха в составе смешанных посевов способствовало снижению количества сырой клетчатки в полученной зерносенажной массе. Более низкий показатель (248 г/кг корма, 1-й класс), характерен для смешанного посева пшеница 25% + горох 75% без внесения N-удобрения. Более высоким содержанием сырого жира (20.6–27.6 г/кг) и сырой золы (27.5–49.6 г/кг) в зерносенажной массе отличались одновидовой и смешанные посевы бобовой культуры.

4. Введение смешанных посевов гороха в состав севооборотов позволяет увеличить накопление энергии и выход кормовых единиц с урожаем за счет повышения урожайности и валового сбора, увеличения общей питательности и оптимизации биохимического состава зерносенажа. Более высокое содержание обменной энергии (+1.28–1.45 МДж/кг) и кормовых единиц (+0.19–0.21 кг) получено в корме смешанного посева (пшеница 25% + горох 75%, 1-й класс).

5. В вегетативной массе смешанного посева гороха и яровой пшеницы накапливалось общего азота от 44 до 130 кг/га, в пожнивно-корневых остатках – 46–101 кг/га. Суммарное накопление в них симбиотического азота составляло 20–108 кг/га. После уборки смешанных посевов на зерносенаж в почву с почвенно-корневыми остатками (ПКО) поступало 16.0–19.5 (пшеница 75% + горох 25%), 38.7–50.3 (пшеница 50% + горох 50%) и 63.9–84.3 (пшеница 25% + горох 75%) кг N/га.

6. Количество поступившего в почву углерода с пожнивными и корневыми остатками в большей степени зависело от урожайности зерносенажной массы. При увеличении доли гороха в посевной норме >50%, отмечено более высокое содержание азота (>2%) в составе зерносенажной массы, за счет чего достигнуто более узкое соотношение C : N = 25.4–27.5 в составе поступающих в почву ПКО.

7. При размещении ярового ячменя в севообороте после смешанных посевов гороха на фоне N0 получена максимальная прибавка урожайности зерна (0.33–0.71 т/га). Данный факт указывал на то, что именно полноценное развитие растений гороха и их симбиотического ризобиального аппарата в большей степени влияло на продуктивность последующей культуры, нежели суммарная

продуктивность посевов и выход ПКО. Использование минерального азота удобрений снижало эффективность симбиотической азотфиксации и агрономическую ценность включения гороха в состав смешанных посевов в качестве предшественника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jensen E.S., Carlsson G., Hauggaard-Nielsen H.* Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis // *Agron. Sustain. Develop.* 2020. V. 40. № 5. Iss. 1. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-0607-x>
2. *Конончук В.В., Штырхунов В.Д., Благоевещенский Г.В., Тимошенко С.М., Соболев С.В., Назарова Т.О.* Азотфиксация гороха сортов немчиновской селекции в зависимости от удобрений на дерново-подзолистой почве Центрального Нечерноземья и вклад фиксированного азота в малый биологический круговорот // *Зернобобов. и круп. культуры.* 2019. № 2 (30). С. 27–35.
3. *Персикова Т.Ф., Почтовая Н.Л.* Эффективность смешанных посевов люпина со злаковыми культурами // *Агротехн. вестн.* 2010. № 1. С. 17–19.
4. *Надежина Н.В., Соколов В.А., Мамадназарбеков А.Ф.* Эффективность ландшафтно-адаптированных технологий совместного выращивания гороха посевного безлисточкового морфотипа с зерновыми культурами в Верхневолжье // *Аграр. вестн. Верхневолжья.* 2019. № 4 (29). С. 26–39.
5. *Лапшин Ю.А.* Смешанные агрофитоценозы как резерв увеличения производства фуражного зерна и более рационального использования земельной площади // *Аграр. наука Евро-Северо-Востока.* 2017. № 3 (58). С. 36–42.
6. *Banik P., Midya A., Sarkar B.K., Ghose S.S.* Wheat and chickpea intercropping systems in an additive series experiment: Advantages and weed smothering // *Eur. J. Agron.* 2006. V. 24. № 4. P. 325–332.
7. *Красноперов А.Г., Буянкин Н.И.* Весенне-летние смешанные посевы // *Зернобоб. и круп. культуры.* 2019. № 2 (30). С. 144–154.
8. *Corre-Hellou G., Dibet A., Hauggaard-Nielsen H., Crozata Y., Gooding M., Ambus P., Dahlmann C., Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S.* The competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability // *Field Crops Res.* 2011. V. 122. № 3. P. 264–272.
9. *Алешин М.А.* Влияние минеральных удобрений на взаимодействие компонентов смешанных посевов в условиях дерново-подзолистой почвы Предуралья // *Пробл. агрохим. и экол.* 2020. № 3. С. 33–38.
10. *Dahmardeh M., Ghanbari A., Syahsar B.A., Ramrodi M.* The role of intercropping maize (*Zea mays* L.) and cow-

- pea (*Vigna unguiculata* L.) on yield and soil chemical properties // *Afric. J. Agricult. Res.* 2010. V. 5 (8). P. 631–636.
11. Long L., Jianhao S., Fusuo Z., Xiaolin L., Sicun Y., Zdenko R. Wheat / maize or wheat / soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients // *Field Crops Res.* 2001. V. 71. № 2. P. 123–137.
 12. Hauggaard-Nielsen H., Jensen E.S. Facilitative root interactions in intercrops // *Plant and Soil.* 2005. V. 274. P. 237–250.
 13. Kaci G., Blavet D., Benlahrech S., Kouakoua E., Couderc P., Deleporte P., Desclaux D., Latati M., Pansu M., Drevon J., Ounane S.M. The effect of intercropping on the efficiency of faba bean – rhizobial symbiosis and durum wheat soil-nitrogen acquisition in a Mediterranean agroecosystem // *Plant Soil Environ.* 2018. V. 64. P. 138–146.
 14. Bedoussac L., Justes E. The efficiency of a durum wheat–winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth // *Plant and Soil.* 2010. V. 330. P. 19–35.
 15. Long L., Fusuo Z. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency // *Plant and Soil.* 2003. V. 248. P. 305–312.
 16. Betencourt E., Duputel M., Colomb B., Desclaux D., Hinsinger P. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil // *Soil Biol. Biochem.* 2012. V. 46. P. 181–190.
 17. Latati M., Bargaz A., Belarbi B., Lazali M., Benlahrech S., Tellah S., Kaci G., Drevon J.J., Ounane S.M. The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability // *Eur. J. Agronomy.* 2016. V. 72. P. 80–90.
 18. Latati M., Dokukin P., Aouiche A., Rebouh N.Y., Takouachet R., Hafnaoui E., Hamdani F.Z., Bacha F., Ounane S.M. Species interactions improve above-ground biomass and land use efficiency in intercropped wheat and chickpea under low soil inputs // *Agronomy.* 2019. V. 9 (11). P. 765.
 19. Aslam M., Mahmood I.A., Peoples M.B., Schwenke G.D., Herridge D.F. Contribution of chickpea nitrogen fixation to increased wheat production and soil organic fertility in rain-fed cropping // *Biol. Fertil. Soils.* 2003. V. 38. P. 59–64.
 20. Latati M., Blavet D., Alkama N., Laoufi H., Drevon J.J., Gérard F., Pansu M., Ounane S.M. The intercropping cowpea–maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil // *Plant and Soil.* 2014. V. 385. P. 181–191.
 21. Latati M., Aouiche A., Tellaha S., Laribia A., Benlahrecha S., Kacia G., Ouarema F., Ounanea S.M. Intercropping maize and common bean enhances microbial carbon and nitrogen availability in low phosphorus soil under Mediterranean conditions // *Eur. J. Soil Biol.* 2017. V. 80. P. 9–18.
 22. Tian Xl., Wang C., Bao Xg. Crop diversity facilitates soil aggregation in relation to soil microbial community composition driven by intercropping // *Plant and Soil.* 2019. V. 436. 173–192.
 23. Tang Xi., Bernard L., Brauman A., Daufresne T., Deleporte P., Desclaux D., Souche G., Placella S.A., Hinsinger P. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions // *Soil Biol. Biochem.* 2014. V. 75. P. 86–93.
 24. Bhim B., Ghaley H., Hauggaard-Nielsen H.J., Jensen E.S. Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization // *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2005. V. 73. P. 201–212.
 25. Fenliang F., Fusuo Z., Yana S., Jianhao S., Xingguo B., Tianwen G., Li L. Nitrogen fixation of faba bean (*Vicia faba* L.) interacting with a non-legume in two contrasting intercropping systems // *Plant and Soil.* 2006. V. 283. P. 275–286.
 26. Li B., Li Y-Y., Wu H.-M., Zhang F.-F., Li C.-J., Li X-X., Lambers H., Li L. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N₂ fixation // *Proceed. Nat. Acad. Sci. USA (PNAS).* 2016. V. 113. № 23. P. 6496–6501.
 27. Andersen M.K., Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S. Biomass production, symbiotic nitrogen fixation and inorganic N use in dual and tri-component annual intercrops // *Plant and Soil.* 2005. V. 266. P. 273–287.
 28. Hauggaard-Nielsen H., Jørnsgaard B., Kinane J., Jensen E.S. Grain legume–cereal intercropping: The practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems, *Renewable* // *Agricult. Food Syst.* 2008. V. 23. Sp. № 1: Researching sustainable agricultural systems. P. 3–12.
 29. Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley // *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2003. V. 65. P. 289–300.
 30. Kurdali F., Sharabi N.E., Arslan A. Rainfed vetch–barley mixed cropping in the Syrian semi-arid conditions I. Nitrogen nutrition using ¹⁵N isotopic dilution // *Plant and Soil.* 1996. V. 183. P. 137–148.
 31. Hauggaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., Correhellou G., Crozat Y., Dahlmann C., Dibet A., Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S. Pea–barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems // *Field Crops Res.* 2009. V. 113. № 1. P. 64–71.
 32. Rodriguez C., Carlsson G., Englund J.-E., Flöhr A., Pelzer E., Jeuffroy M.-H., Makowski D., Jensen E.S. Grain legume–cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate

- agroecosystems. A meta-analysis // Eur. J. Agron. 2020. V. 118. P. 126077.
33. *Naudin C., Corre-Hellou G., Voisin A.-S., Oury V., Salon C., Crozat Y., Jeuffroy M.-H.* Inhibition and recovery of symbiotic N₂ fixation by peas (*Pisum sativum* L.) in response to short-term nitrate exposure // Plant and Soil. 2011. V. 346. № 1. P. 275–287.
34. *Naudin C., Corre-Hellou G., Pineau S., Crozata Y., Jeuffroy M.-H.* The effect of various dynamics of N availability on winter pea–wheat intercrops: Crop growth, N partitioning and symbiotic N₂ fixation // Field Crops Res. 2010. V. 119. № 1. P. 2–11.
35. *Ohyama T., Fujikake H., Yashima H., Tanabata S., Ishikawa S., Sato T., Nishiwaki T., Ohtake N., Sueyoshi K., Ishii S., Fujimaki S.* Effect of nitrate on nodulation and nitrogen fixation of soybean // Soybean Physiology and Biochemistry. Intech Open. P. 333–364.
36. *Li Y., Yu C., Cheng X., Li C., Sun J., Zhang F., Lambers H., Li L.* Intercropping alleviates the inhibitory effect of N fertilization on nodulation and symbiotic N₂ fixation of faba bean / Plant and Soil. 2009. V. 323 (1/2). P. 295–308.
37. *Волошин В.А.* Каталог кормов Пермского края Пермь, 2016. 106 с.
38. Методические указания по оценке качества и питательности кормов. М.: ЦИНАО, 2002. 76 с.
39. *Завалин А.А., Благовещенская Г.Г., Кожемяков А.П.* Вклад биологического азота бобовых культур в азотный баланс земледелия России. Методика определения. М.: РАСХН, 2007. 44 с.
40. *Акманаев Э.Д., Баландин Б.Н., Баландина Е.В., Волошин В.А., Елисеев С.Л., Зубарев Ю.Н., Каменских Н.Ю., Кузякин Д.В., Маслов И.Л., Медведева И.Н., Фомин Д.С., Чесноков А.В., Юдин В.С.* Инновационные технологии в агробизнесе: учеб. пособ. / Под ред. Зубарева Ю.Н., Елисеева С.Л., Ренева Е.А. М., Пермь: Пермская ГСХА, 2012. 335 с.
41. *Huňady I., Hochman M.* Potential of legume–cereal intercropping for increasing yields and yield stability for self-sufficiency with animal fodder in organic farming // Czech. J. Genet. Plant Breed. 2014. V. 50. P. 185–194.
42. *Косолапова А.И., Возжаев В.И., Лейних П.А.* Урожайность и качество зерна яровой пшеницы в зависимости от применения минеральных удобрений // Перм. аграр. вестн. 2017. № 3 (19). С. 76–80.
43. *Li Q.-Z., Sun J.-H., Wei X.-J., Christie P., Zhang F.-S., Li L.* Over yielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley / Plant and Soil. 2011. V. 339. P. 147–161.
44. *Мищихина О.С., Михайлова Л.А.* Биологическая эффективность смешанного посева яровой пшеницы и посевного гороха при уборке на зерно в зависимости от доз азота // Перм. аграр. вестн. 2017. № 3 (19). С. 96–101.
45. *Кононов А.С., Белоус Н.М., Торицов В.Е., Мельникова О.В., Шкотова О.Н.* Теория экологической ниши в сельском хозяйстве и методика расчета взаимодействия видов в гетерогенном агроценозе // Зернобоб. и круп. культуры. 2017. № 2 (22). С. 59–67.
46. *Getachew A., Amare G., Woldeyesus S.* Yield performance and land–use efficiency of barley and faba bean mixed cropping in Ethiopian highlands // Eur. J. Agron. 2006. V. 25. № 3. P. 202–207.
47. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Метод оценки азотфиксирующей способности бобовых растений на основе симбиотических мутантов // Междуна-род. сел.-хоз. журн. 2016. № 2. С. 49–51.
48. *Saito A., Tanabata S., Tanabata T., Tajima S., Ueno M., Ishikawa S., Ohtake N., Sueyoshi K., Ohyama T.* Effect of nitrate on nodule and root growth of soybean (*Glycine max* L.) Merr.) // Inter. J. Mol. Sci. 2014. V. 15 (3). P. 4464–4480.
49. *Giles E.D. Oldroyd, Murray J.D., Poole P.S., Downie J.A.* The Rules of engagement in the legume–rhizobial symbiosis // Ann. Rev. Genet. 2011. V. 45. P. 119–144.
50. *Cao Y., Halane M.K., Gassmann W., Stacey G.* The Role of plant innate immunity in the legume–rhizobium symbiosis // Ann. Rev. Plant Biol. 2017. V. 68. P. 535–561.
51. *Пасынкова Е.Н.* Динамика конкурентных отношений в потреблении азота растениями яровой пшеницы и вики, возделываемых в смешанных посевах // Аграр. наука Евро-Северо-Востока. 2010. № 2 (17). С. 28–33.
52. *Волошин В.А.* Вопросы полевого кормопроизводства в Предуралье. Пермь: Изд-во “ОТ и ДО”, 2012. 379 с.
53. *Кучин Н.Н., Мансуров А.П.* Изменение степени силосуемости и питательности многолетних бобовых трав в зависимости от фазы развития травостой и степени проявлявания // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 3 (1). С. 149–152.
54. *Алешин М.А., Михайлова Л.А.* Изменение урожайности и биохимического состава зерна полевых культур в смешанных посевах при использовании минеральных удобрений // Плодородие. 2020. № 2 (113). С. 9–13.
55. *Азаров Б.Ф., Акулов П.Г., Азаров В.Б., Соловichenко В.Д.* Вклад симбиотического азота бобовых в плодородие почв Центрального Черноземья // Достиж. науки и техн. АПК. 2008. № 9. С. 9–11.
56. *Задорин А.Д., Исаев А.П., Новиков В.М., Селихов С.Н.* Роль зернобобовых и крупяных культур в развитии устойчивого земледелия // Земледелие. 2012. № 5. С. 7–9.
57. *Кузнецова Т.В., Семенов А.В., Ходжаева А.К., Иванникова Л.А., Семенов В.М.* Накопление азота в микробной биомассе серой лесной почвы при разло-

- жении растительных остатков // Агрохимия. 2003. № 10. С. 3–12.
58. *Vigil M.F., Kissel D.E.* Equations for estimating the amount of nitrogen mineralized from crop residues // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 1991. V. 55. P. 757–761.
59. *Henriksen T.M., Breland T.A.* Evaluation of criteria for describing crop residue degradability in a model of carbon and nitrogen turnover in soil // *Soil Biol. Biochem.* 1999. V. 31. P. 1135–1149.
60. *Evans J., McNeill A.M., Unkovich M.J., Fettell N.A., Heenan D.P.* Net nitrogen balances for cool-season grain legume crops and contributions to wheat nitrogen uptake: a review // *Austr. J. Exp. Agric. 2001. V. 41 (3). P. 347–359.*

Efficiency of Application of Nitrogen Fertilizer in Mixed Crops of Peas and Wheat in Crop Rotation

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

^a *D.N. Pryanishnikov Perm State Agro-Technological University
Petropavlovskaya ul. 23, Perm 614990, Russia*

^b *D.N. Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia*

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

The results of a field experiment to determine the effect of nitrogen nutrition levels (N₀, N₃₀, N₆₀) on the yield of mixed agrocenoses of peas (wheat 75% + pea 25%, wheat 50% + pea 50%, wheat 25% + peas 75%) in comparison with single-species crops (spring wheat, seeded peas) are presented. The maximum yield of the grain mass (12.1 t/ha) was obtained in a mixed agrocenosis – wheat 25% + pea 75%, with the introduction of N₆₀. With an increase in the proportion of pea (25%–50%–75%), the content of crude protein increases to 139–149 g/kg (class 1) and the amount of crude fiber decreases to 248 g/kg (class 1) in the composition of the resulting feed. The accumulation of crop-root residues in the soil is determined by the productivity and composition of mixed agrocenoses and reaches 3.33–4.05–4.04–5.24–4.44–5.86 t/ha. After harvesting, the soil receives 16.0–19.5 (wheat 75% + pea 25%), 38.7–50.3 (wheat 50% + pea 50%) and 63.9–84.3 (wheat 25% + pea 75%) kg/ha of total nitrogen, while depending on the composition of agrocenoses, 20–108 kg N/ha was received due to symbiotic nitrogen fixation. With an increase in the proportion of peas in the sown mixture over 50%, a higher nitrogen content (>2%) in the composition of the grain mass and a narrower C : N ratio = 25.4–27.5 are observed. When growing spring barley in the crop rotation after mixed agrocenoses of peas, against the background of N₀, the increase in grain yield was 0.33–0.71 t/ha.

Key words: nitrogen doses, mixed agrocenoses, seeded peas, crop yield, biochemical composition, biological nitrogen, crop–root residues, C : N ratio.