

А.А. Завалин, О.А. Соколов, Н.Я. Шмырева

# ЭКОЛОГИЯ АЗОТФИКСАЦИИ

Москва 2019

Российская академия наук  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
агрехимии имени Д.Н. Прянишникова

**А.А. Завалин, О.А. Соколов, Н.Я. Шмырева**

# **Экология азотфиксации**

Москва  
2019

УДК 581.579.133.1  
ББК 40.4  
3-13

Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я.  
3-13 **Экология азотфиксации** / А.А. Завалин, О.А. Соколов, Н.Я. Шмырева. – М.: РАН, 2019. – 252 с.; таблиц – 187, рисунки – 6, литература – 512.  
**ISBN 978-5-907036-03-1**

Показаны эколого-биологические особенности бобовых растений, механизмы и размеры симбиотической и ассоциативной азотфиксации и агроэкологическая роль бобовых растений в агроландшафтах. В основе азотфиксации лежит сложный механизм лектин-углеводного взаимодействия растений и микроорганизмов. Размеры симбиотической азотфиксации могут достигать 150–550, ассоциативной – 25–90 кг N/га. Варьирование размеров фиксации азота определяется генотипическими признаками бобовых растений и микросимбионта и действием экологических факторов природного (тип и влажность почвы, температура, кислотность, засоление) и антропогенного характера (использование минеральных и органических удобрений, микроудобрений, применение инокуляции микробными препаратами, воздействие пестицидов, тяжелых металлов, радионуклидов, газов, эрозия почв). В частности загрязненных агроэкосистемах бобовые растения формируют нормативно чистую растениеводческую продукцию. Вместе с тем в их урожае возможно накопление веществ природного происхождения и ряда загрязняющих компонентов (нитраты, тяжелые металлы, остатки пестицидов и радионуклиды).

УДК 581.579.133.1  
ББК 40.4

Рецензенты:

академик Российской академии наук М.С. Соколов;  
доктор биологических наук В.М. Семенов.

ISBN 978-5-907036-03-1

© Завалин А.А., Соколов О.А.,  
Шмырева Н.Я., 2019

# Содержание

<b>Введение</b> .....	9
<b>Глава 1. Эколого-биологические особенности бобовых растений</b> .....	10
<b>Глава 2. Молекулярные механизмы и размеры фиксации азота</b> .....	22
2.1 Молекулярные механизмы азотфиксации .....	22
2.2 Размеры симбиотической и ассоциативной фиксации азота .....	29
2.3 Агроэкологическая роль бобовых растений в агроландшафте .....	35
<b>Глава 3. Экология симбиотической и ассоциативной азотфиксации</b> .....	60
3.1 Природные факторы .....	60
3.1.1 Тип и влажность почвы .....	60
3.1.2 Влияние температуры.....	69
3.1.3 Отношение бобовых растений к кислотности почвы .....	72
3.1.4 Отношение бобовых растений к засолению почвы .....	77
3.2 Антропогенные факторы.....	81
3.2.1 Азот в питании бобовых растений .....	81
3.2.2 Фосфор в питании бобовых растений .....	94
3.2.3 Калий в питании бобовых культур.....	100
3.2.4 Эффективность и целесообразность применения минеральных удобрений под бобовые растения.....	104
3.2.5 Влияние микроэлементов на процессы фиксации азота бобовыми растениями .....	109
3.2.6 Эффективность действия инокуляции на активность бобово-ризобияльного комплекса .....	114
3.2.7 Роль генотипа в фиксации атмосферного азота.....	121
3.2.8 Устойчивость бобовых растений к действию пестицидов .....	127
3.2.9 Особенности токсического действия тяжелых металлов на бобовые растения.....	131

3.2.10 Радиационная устойчивость бобовых растений .....	138
3.2.11 Газоустойчивость бобовых растений.....	141
3.2.12 Действие эрозии почв на азотфиксацию бобовых растений ....	143
3.2.13 Устойчивость бобовых растений к биотическим факторам .....	162
3.2.14 Участие бобовых растений в фитомелиорации почв .....	169
<b>Глава 4. Экологически безопасная продукция бобовых растений .....</b>	<b>188</b>
4.1 Качество урожая отдельных культур .....	188
4.2 Накопление загрязняющих веществ в урожае бобовых растений ...	205
<b>Заключение.....</b>	<b>222</b>
<b>Литература .....</b>	<b>223</b>

Russian Academy of Sciences  
All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry  
named after D. N. Pryanishnikov

**A.A. Zavalin, O.A. Sokolov, N.Ya. Shmyreva**

**Ecology  
nitrogen fixation**

Moscow 2019

UDC 581.579.133.1.  
BBK 40.4  
Z-13

Zavalin A.A., Sokolov O.A., Shmyreva N.Ya.

Z-13 **Ecology of nitrogen fixation** / A.A. Zavalin, O.A. Sokolov, N.Ya. Shmyreva. – M.: RAS, 2019. – 252 s.; tables – 187, figures – 6, literature – 512.

Ecological and biological characteristics of legumes, mechanisms and sizes of symbiotic and associative nitrogen fixation, and the agro-ecological role of legumes in agrolandscapes are shown. Nitrogen fixation is based on the complex mechanism of lectin-carbohydrate interactions between plants and microorganisms. The sizes of symbiotic nitrogen fixation can reach 150–550, associative – 25–90 kg N/ha. The variation in the sizes of nitrogen fixation is determined by the genotypic characters of legumes and microsymbiont and the action of environmental factors of nature (soil type and moisture, temperature, acidity, salinization) and anthropogenic nature (use of mineral and organic fertilizers, micronutrient fertilizers, the use of inoculation with microbial preparations, exposure to pesticides, heavy metals, radionuclides, gases, soil erosion). In partially polluted agroecosystems, leguminous plants form normatively pure crop products. At the same time, their harvest may accumulate substances of natural origin and a number of polluting components (nitrates, heavy metals, pesticide residues and radionuclides).

UDC 581.579.133.1.  
BBK 40.4

Reviewers:

Academician of the Russian Academy of Sciences M.S. Sokolov;  
Doctor of Biological Sciences V.M. Semenov.

# Content

Chapter 1. Ecological and biological characteristics of legumes .....	10
Chapter 2. Molecular mechanisms and sizes of nitrogen fixation .....	22
2.1 Molecular mechanisms of nitrogen fixation .....	22
2.2 Dimensions of symbiotic and associative fixation of nitrogen .....	29
2.3 Agroecological role of legumes in agrolandscape .....	35
Chapter 3. Ecology of symbiotic and associative nitrogen fixation.....	60
3.1 Natural factors.....	60
3.1.1 Type and soil moisture .....	60
3.1.2 Effect of temperature .....	69
3.1.3 The ratio of legumes to soil acidity .....	72
3.1.4 The ratio of legumes to salinization of the soil.....	77
3.2 Anthropogenic factors.....	81
3.2.1 Nitrogen in the nutrition of legumes.....	81
3.2.2 Phosphorus in the nutrition of legumes .....	94
3.2.3 Potassium in the nutrition of legumes .....	100
3.2.4 Efficiency and feasibility of using mineral fertilizers for legumes...	104
3.2.5 Effect of trace elements on nitrogen fixation by legumes.....	109
3.2.6 The effectiveness of inoculation on the activity of the bean-rhizobial complex .....	114
3.2.7 Role of the genotype in the fixation of atmospheric nitrogen .....	121
3.2.8 Resistance of legumes to pesticides.....	127
3.2.9 Features of the toxic effects of heavy metals on legumes.....	131
3.2.10 Radiation resistance of legumes .....	138
3.2.11 Gas resistance of legumes.....	141
3.2.12 Effect of soil erosion on nitrogen fixation of legumes.....	143

3.2.13 Resistance of legumes to biotic factors .....	162
3.2.14 Legume participation in soil phytomelioration.....	169
Chapter 4. Environmentally friendly legume products.....	188
4.1 Crop quality of individual crops .....	188
4.2 The accumulation of pollutants in the crop of legumes.....	205
Conclusion .....	222
Literature.....	223

## Введение

Бобовые растения, обладая средообразующим действием на агроэкосистемы, повышают плодородие почвы; защищают почвы от их деградации; увеличивают продуктивность последующих культур севооборота; регулируют круговорот азота в системе почва – растение – атмосфера; снижают антропогенные нагрузки на экосистему; переводят труднодоступные формы элементов питания в легкодоступные; снижают опасность загрязнения продукции нитратами; служат источником усвояемых белков, витаминов, солей; улучшают видовое разнообразие и повышают устойчивое развитие агрофитоценоза; являются основным компонентом энергосберегающих технологий производства экологически безопасной продукции и растительного белка; участвуют в фитомелиорации загрязненных почв.

Симбиоз бобовых культур с клубеньковыми бактериями является одной из уникальных и эффективных растительно-микробных природных систем, осуществляющих процесс биологической азотфиксации и имеющий огромное экологическое значение. Бобовые растения в симбиозе с ризобиями ежегодно в мире фиксируют 150 млн т азота, из которых на долю сои приходится 16,4 млн т (Crews, Peoples, 2005; Herridge, Peoples, 2008; Peoplesetal, 2008). В зависимости от уровня плодородия почвы доля атмосферного азота в общем его потреблении бобовыми растениями колеблется от 0 до 95%, составляя в среднем 58% (Мишустин, Шильникова, 1968; Трепачев, 1999; Alvesetal., 2003; Russell, Birt, 2004).

Актуальные задачи на ближайшее будущее: повышение эффективности использования уникального природного реактора азотфиксации, создание высокопродуктивных растительно-ризобияльных комплементарных систем, устойчивых к комплексу природных и антропогенных факторов. Оптимизация соотношения биологического и технического (промышленного) азота лежит в основе стратегии устойчивого развития земледелия страны. Без бобовых растений не решить проблему получения экологически безопасной продукции для человека и животных.

## Глава 1. Эколого-биологические особенности бобовых растений

Бобовые растения относятся к большой группе универсальных сельскохозяйственных культур, которых используют как пищевые продукты, корм для животных и птицы, зеленое удобрение и компосты для сохранения и повышения плодородия почвы (Новиков и др., 2004; Посыпанов и др., 2007; Карпук, Сидорова, 2011; Лошаков, 2015). Для успешного возделывания они требовательны к широкому спектру экологических факторов: температуре, влажности, освещенности, биоте, содержанию органического вещества и питательных веществ в почве, pH почвенного раствора. Хотя некоторые из них (люпин, сераделла, эспарцет) хорошо растут на малоплодородных почвах, другие участвуют в фитореставрации загрязненных почв, легко переносят затенение. Обладая мощным пулом атмосферного (биологического) азота, они стабилизируют круговорот веществ в системе «почва – растение», повышая устойчивость агрофитоценоза (Кузмичева, Парахин, 2015; Гурина, Кулинич, 2015; Сихарулидзе и др., 2016).

Благодаря своим универсальным биологическим свойствам бобовые растения являются уникальной средообразующей, экологически безопасной культурой, определяя важнейшее направление развития сельскохозяйственного производства. Бобовые растения – это культуры многоцелевого значения: регуляторы плодородия почв; продукты питания и корма; сырье для переработки на пищевые и кормовые цели.

Для регуляции плодородия почвы бобовые растения используют как:

- сидераты;
- занятой пар;
- поукосные посевы;
- пожнивные посевы;
- покровные культуры;
- растительные остатки;
- растительные компосты;
- компосты с торфом, соломой, сапропелем;
- окультуривание бросовых земель;
- фитомелиорацию загрязненных почв.

Бобовые растения являются важнейшим источником корма для сельскохозяйственных животных. Ведь это:

- пастбища и зеленая масса;
- сено;
- зерно;

- зерносенаж;
- сенаж;
- силос;
- белково-витаминные добавки;
- белковые изоляты;
- жмых, шрот, соевая мука.

Бобовые растения используют на пищевые цели как:

- свежий продукт;
- мука;
- жиры и масла;
- молоко;
- консервы;
- заморозки и пасты;
- ингредиенты хлебобулочных, макаронных, кондитерских изделий;
- составляющие мясоконсервных и колбасных изделий;
- лечебно-диетические продукты.

**Бобы кормовые.** Выделяют три разновидности – минор, эквина, майор, которые различаются по высоте стебля и массе 1000 семян. Период вегетации – от 90 до 140 дней. Растения длинного дня.

Бобы – культура холодостойкая. Семена прорастают при 3–4 °С, а всходы выдерживают заморозки до -5 °С. Менее устойчивы к низким температурам во время плодоношения. Для созревания урожая отдельным сортам требуется сумма активных температур 1900 °С. Культура влаголюбивая, формирует хороший урожай семян и зеленой массы при выпадении 350–400 мм осадков. Медленное прорастание семян бобов (по сравнению с горохом и фасолью) связано с наличием толстой кожуры, медленно пропускающей воду. Бобы – не строгие самоопылители, могут опыляться пчелами и шмелями.

Эти культуры хорошо растут на нейтральных или слабощелочных почвах ( $pH_{\text{сол}}$  6,0–7,0) с высоким содержанием органического вещества. Они не переносят тяжелых суглинистых и кислых почв. Не переносят затопления, а также присутствия алюминия в количестве свыше 1 мг/100 г почвы. От его высокой концентрации растения подсыхают на корню.

**Вика посевная (яровая).** Высокая продуктивность (150–300 ц/га зеленой массы, 10–26 ц/га семян), экологическая пластичность, питательные достоинства (16–24% белка в зеленой массе и 31–34% в семенах) обеспечили культуре широкое распространение. Оптимальная температура для формирования урожая – 12–20 °С, сумма активных температур – 1900 °С. Семена вики прорастают при 2–3 °С, ее всходы переносят весенние заморозки -3 –4 °С. Вика посевная влаголюбива, типичная культура длинного дня. Оптимальными для нее являются регионы с осадками свыше 450 мм в год и 175–200 мм за май–июль. Критический период у вики – первая половина цветения. Недостаток или избыток влаги в этот период сильно влияет на развитие растений и урожай семян.

До начала цветения вика растет медленно. Засушливая погода сокращает период цветения в 2–3 раза, вызывая выпадение цветков. В дожд-

ливую погоду цветение затягивается. При благоприятных условиях вика цветет 20–30 дней, она типичный самоопылитель. Наиболее требовательна к теплу период образования плодов. Способна давать второй укос (отаву).

Вика малотребовательна к плодородию почвы. Хорошо растет на суглинистых, глинистых, серых лесных, супесчаных черноземах ( $\text{pH}_{\text{сол}} 5,0\text{--}6,5$ ), плохо – на легких песчаных и очень плохо – на кислых, засоленных и заболоченных почвах.

**Вика мохнатая (озимая).** Нетребовательная к почве культура, влаголюбива, хорошо переносит затенение, зимостойкость невысокая. Формирует высокие урожаи на легких почвах (супеси, песчаные), а также на почвах с реакцией почвенного раствора, близкой к нейтральной. Вика мохнатая не выдерживает кислых почв. В южных районах страны с теплой продолжительной осенью вику мохнатую возделывают как пожнивную культуру.

**Горох.** Обладает высокой экологической пластичностью. Культура длинного дня, холодостойкая – всходы выдерживают заморозки до  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Сумма активных температур за вегетацию составляет 1200–1600  $^{\circ}\text{C}$ . Требовательна к влаге, отрицательно реагирует на почвенную засуху. Горох страдает от сорных растений: в их присутствии его продуктивность снижается на 30–50%.

Помимо пищевой и кормовой ценности, горох имеет большое агро-техническое значение, являясь ценным предшественником для посева пшеницы. Продолжительность периода вегетации гороха на дерново-подзолистой почве сокращается на 7–9 дней, чем при выращивании его на черноземной почве, за счет уменьшения периода цветения/созревания (Гудинова, 1972).

Наибольшее количество клубеньков на корнях гороха формировалось в период бутонизации – начала цветения (8–103 шт. на одно растение). Размеры, форма и цвет клубеньков зависят от типа почвы. На черноземной клубеньки имеют грушевидную и округлую форму и розовую окраску. К концу вегетации они приобретают зеленый цвет. На дерново-подзолистой почве на корнях гороха формируются клубеньки более округлой и слегка вытянутой формы. Они имеют желтовато-белую окраску с зеленоватым оттенком. Клубеньки располагаются в основном на главном корне и боковых корешках.

Мобильной формой углеводов вегетативных органов гороха являются моносахара, которые обеспечивают транспорт сахаров из надземной массы в корневую систему и клубеньки. Моносахара создают благоприятные условия для роста и развития клубеньков (табл. 1.1).

На обоих типах почв (чернозем выщелоченный, дерново-подзолистые) большему содержанию сахаров в вегетативных органах гороха соответствовало большее развитие клубеньков. При инокуляции семян и применении удобрений масса клубеньков повышалась в 1,7 раза, а содержание сахаров – на 17% (Гудинова, 1972).

Таблица 1.1 – Влияние биопрепарата нитрагин и удобрений на содержание моносахаров в вегетативных органах гороха и развитие клубеньков (Гудинова, 1972)

Вариант опыта	Моносахара, %	Масса клубеньков с одного растения, г
Контроль (без удобрений)	5,75	43,4
Нитрагин	5,87	49,1
Нитрагин + P100	6,00	60,0
Нитрагин + P100+ Mo	6,75	72,8

Горох – это культура богатых, высокоплодородных почв. Лучше всего он растет на черноземах, серых лесных, дерново-подзолистых суглинистых по гранулометрическому составу почвах. Горох плохо растет на легких песчаных и супесчаных почвах, на плотных и бесструктурных почвах тяжелого состава, не выносит заболачивания. При этом нарушается симбиоз бактерий и растений, которые испытывают голодание по азоту.

**Донник.** В культуре выращивают два вида донника: белый и желтый (лекарственный). В природных экосистемах растет 11 видов донника. Он предъявляет умеренные требования к температуре. Всходы выдерживают кратковременные заморозки ( $-3-6^{\circ}\text{C}$ ). В первый год жизни для формирования репродуктивных органов ему необходима сумма среднесуточных температур  $1300-1600^{\circ}\text{C}$ . На второй год жизни происходит раннее отрастание при температуре воздуха  $5-10^{\circ}\text{C}$ . За весь период от весеннего отрастания до созревания семян необходима сумма среднесуточных температур воздуха  $1600-2000^{\circ}\text{C}$ . У донника желтого период от весеннего отрастания до созревания семян короче на 18–20 дней, а сумма среднесуточных температур воздуха меньше на  $300^{\circ}\text{C}$ .

Донник – растение умеренного и засушливого климата, он лучше других культур переносит почвенную и воздушную засуху. Критическим периодом недостатка влаги в почве является период бутонизации – начало цветения. Донник требователен к свету. Хорошо растет на щелочных и карбонатных, а также слабокислых лесных почвах Нечерноземья, на черноземах и каштановых почвах. На низкоплодородных кислых растет слабо. Оптимальными для роста и развития донника являются почвы, богатые известью (рН 6,0 и выше).

**Клевер луговой.** В России возделывают 20 видов клевера. На кормовые цели выращивают клевер луговой (красный), клевер ползучий (белый) и клевер гибридный (розовый). Клевер представлен двумя сорто типами: раннеспелым (двуукосным) и позднеспелым (одноукосным). Раннеспелые сорта клевера выращивают в южных, юго-западных и западных районах. Поздне-спелые сорта выращивают в северных, северо-восточных, восточных и центральных районах страны. Рост клубеньков совпадает с образованием первого тройчатого листа, а максимума достигает в период цветения. Позднеспелые сорта формируют более развитый симбиотический аппарат, чем раннеспелые. Клевер южного типа отличается пониженной зимостойкостью. Клевер достаточно теневынослив, поэтому его подсевают под различные культуры (ячмень, озимая рожь, овес). Не подсевают клевер под те сорта зерновых, которые склонны к полеганию.

Клевер возделывают на оподзоленных черноземах, темно-серых лесных, окультуренных и произвесткованных дерново-подзолистых и подзолистых почвах. В Нечерноземной зоне клевер выращивают на аллювиально-луговых, луговых почвах и торфяниках. В условиях Северного Кавказа клевер формирует хорошие урожаи сена на выщелоченных слабосмытых черноземах, тяжелых глинистых серых лесостепных почвах. Хуже клевер растет на легких супесчаных и песчаных почвах. При  $pH_{\text{сол}}$  почвенного раствора ниже 4,5 клевер выпадает.

**Козлятник восточный.** При продуктивности 70–80 т/га зеленой массы козлятник может произрастать на одном месте 8–10 лет. Он достаточно морозостоек и зимой выдерживает до  $-25^{\circ}\text{C}$ . Существует две формы козлятника: северокавказская и лорийская. Северокавказская форма широко используется в кормопроизводстве. Растения накапливают до 400 кг/га клубеньков. После укоса большая часть клубеньков разрушается, а по мере отрастания растений клубеньки образуются вновь.

Козлятник требователен к свету и чувствителен к засоренности, особенно в первый год жизни. Наиболее чувствительны растения к недостатку влаги в первый год жизни, когда корневая система только формируется. Однако растение не переносит близкого залегания грунтовых вод, хотя выдерживает двух-трехнедельное затопление, поэтому его можно выращивать на пойменных землях. Благодаря мощной корневой системе посеvy козлятника используют на склоновых эродированных почвах.

Растение предпочитает плодородные влажные почвы. Козлятник также выращивают на окультуренных дерново-карбонатных и дерново-подзолистых почвах. Благоприятны для козлятника почвы, богатые органическим веществом, чистые от сорняков, с глубоким пахотным слоем. На низкоплодородных почвах козлятник растет плохо. Реакция почвенного раствора должна быть близкой к нейтральной или слабощелочной, что способствует развитию симбиотического аппарата.

**Люпин многолетний.** На второй год жизни формирует 30 т/га зеленой биомассы, растет на одном месте 8–10 лет. Отличается высокой зимостойкостью. Это скороспелое растение северных регионов страны. Светлолюбиво и чувствительно к недостатку влаги. В первый год жизни сильно страдает от сорняков.

Негативными свойствами люпина многолетнего являются сильная растрескиваемость бобов, осыпаемость семян и их высокая твердость. Кормовые сорта содержат не больше 0,01% алкалоидов, и они пригодны для скармливания скоту. Однако эти сорта быстро утрачивают безалкалоидность. По содержанию белка в зеленой массе люпин многолетний не уступает клеверу. Быстро отрастает после скашивания, в результате дает несколько укосов зеленой массы.

Продолжительность жизни люпина зависит от типа почв: 6–7 лет на суглинистых и 4–5 – на супесчаных. Изреживание посевов начинается с 4–5-го года жизни.

Люпин многолетний является первым по устойчивости к кислым почвам: он образует клубеньки, фиксирует азот воздуха при  $pH_{\text{сол}}$  4,5–6,5. Хорошо

растет на бедных питательными веществами супесчаных почвах. На почвах с нейтральной и слабощелочной реакцией не образует клубеньки на корнях.

**Люпин однолетний.** Люпин – универсальная культура, обладающая высокими средообразующими свойствами, кормопродукционным и ресурсосберегающим потенциалом. Культура, формирующая урожай зеленой массы 45–60 т/га, способная аккумулировать в биомассе 100–300 кг/га экологически безопасного биологического азота (Новиков и др., 2002). Кроме люпина белого, в культуру входят люпин желтый и люпин узколистый благодаря их меньшей требовательности к теплу и к плодородию почвы. К особенностям люпина относятся: развитие мощной корневой системы на малоплодородных почвах; использование труднорастворимых фосфатов почвы; фиксация азота атмосферы в симбиозе с клубеньковыми бактериями на кислых почвах. Наиболее распространен люпин желтый, способный произрастать на легких супесчаных и песчаных почвах.

Люпин требователен к теплу, особенно в период налива и созревания семян; при температуре ниже 14 °С развитие растений замедляется. За период вегетации растениям белого люпина необходима сумма активных температур 2600–2800 °С, желтого – 2400–2600 °С, узколистого – 1800–2000 °С. Люпин чувствителен к недостатку влаги в период бутонизации – цветения. Это светолюбивое растения длинного дня. Люпин узколистый и люпин белый требуют более связанных и плодородных почв. Заболоченных, засоленных и уплотненных растение не выносит. Активная азотфиксация у люпина развивается при  $pH_{\text{сол}} 6,0$ .

**Люцерна.** Королева кормовых культур. При орошении дает до 35 т/га, а на богаре до 20 т/га сена. Наибольшее распространение получили: люцерна посевная (синяя), люцерна серповидная (желтая), люцерна средняя (изменчивая). Растение длинного дня, с высокой зимостойкостью: она более светолюбива, чем клевер луговой. Весеннее отрастание у люцерны начинается при температуре 7–9 °С. Люцерна – типичный мезофит, она требует оптимальной влагообеспеченности; в то же время она засухоустойчива благодаря мощной корневой системе. Отдельные экотипы желтой люцерны выдерживают затопление в течение 20–30 дней. Наибольшей азотфиксирующей способностью люцерна обладает в южных районах при орошении, где она может фиксировать до 500 кг N/га (Посыпанов и др., 2007).

Люцерну возделывают во всех южных и восточных регионах страны; в степной, лесостепной зонах на всех подтипах черноземов ( $pH_{\text{с}} 6,5–7,0$ ), а также в зоне сухих степей на каштановых почвах ( $pH_{\text{сол}} 6,5–7,8$ ). В Нечерноземье люцерну возделывают на окультуренных, произвесткованных дерново-подзолистых и серых лесных почвах. Она не выдерживает кислых почв: при  $pH_{\text{сол}} 5,0$  клубеньки на корнях не развиваются. Экологической особенностью люцерны является слабая чувствительность к уплотнению почвы, поэтому ее выращивают и на тяжелых глинистых, заплывающих и бесструктурных почвах.

**Лядвенец рогатый.** Лядвенец за один укос может дать до 30 т/га зеленой массы; на одном месте растет 10 лет и более, но наибольшей продуктивности достигает на второй-третий год жизни. Теневынослив, зимостоек и морозостоек. Летом лядвенец хорошо переносит перегрев (28–30 °С), тогда как листья клевера теряют тургор. Лядвенец отличается высокой устойчивостью к неблагоприятным условиям погоды. В цветоносных побегах содержит цианогенный глюкозид. В этом случае возможно укосное использование травостоя лядвенца на зеленое удобрение. Масса листьев достигает 50% от общего урожая. Лядвенец малотребователен к плодородию почв: хорошо растет на песчаных и суглинистых, переносит засоление и подкисление, отзывчив на внесение извести и удобрений. Но не переносит избыточного увлажнения, хотя может выдерживать затопление в течение 25–50 дней (Лошаков, 2015).

Лядвенец выращивают в средней полосе России на черноземных и серых лесных почвах, в центральных и северо-западных областях Нечерноземья на дерново-подзолистых; в условиях Черноморского побережья Кавказа.

**Многолетние бобовые травы.** Многолетним бобовым травам отводится существенная роль в сохранении плодородия почв, получении экологически безопасной продукции растениеводства и животноводства и обеспечении экологически безопасного состояния агроэкосистем (Кожемяков, 1989; Тихонович, Проворов, 1993; Моисеев, 2000; Черников, Соколов, 2009; Cresshoff et al., 1992; Newton, 1994; Athar, Johnson, 1996).

Важно понять, как ведут себя различные виды бобовых растений в одинаковых почвенно-экологических условиях. Так, на дерново-подзолистой почве в первый год жизни наибольшее количество клубеньков формировал на одном растении донник белый, наименьшее – люцерна посевная (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Развитие симбиотического аппарата и накопление сухой массы многолетних бобовых трав в фазу бутонизации – начала цветения (Абдушаева и др., 2008)

Культура	Количество клубеньков, шт./растение	Сухая масса клубеньков, г/растение	Сухая масса, г/растение		
			корни	стебли	листья
Первый год жизни					
Донник белый	22	10,5	25,3	24,5	6,1
Донник желтый	15	18,1	19,8	21,2	5,5
Козлятник восточный	14	26,7	28,9	19,5	11,8
Лядвенец рогатый	16	35,1	26,4	10,2	9,7
Люцерна посевная	11	12,4	24,8	14,7	9,1
Второй год жизни					
Донник белый	36	16,8	32,4	26,4	11,7
Донник желтый	24	25,4	26,7	22,9	10,1
Козлятник восточный	22	38,7	35,4	29,7	16,8
Лядвенец рогатый	26	26,7	31,2	22,4	14,2
Люцерна посевная	30	14,8	32,1	26,7	14,8
Третий год жизни					
Козлятник восточный	59	43,2	49,8	32,5	25,4
Лядвенец рогатый	55	38,7	38,4	26,4	18,4
Люцерна посевная	61	21,5	34,5	28,9	16,4

На второй год жизни люцерна сформировала клубеньков в 2,7 раза больше, тогда как донник белый – в 1,6 раза. На третий год жизни у козлятника количество клубеньков возросло в 4,2 раза, а у люцерны – в 5,5 раза, при этом донники вообще выпали. Большой массой клубеньков обладают козлятник и лядвенец. Клубеньки у них формировались по всей длине корней до глубины 35 см (Абдушаева и др., 2008). Во все годы жизни наибольший листовой аппарат формировал козлятник; несколько меньше – лядвенец.

Бобовые растения при рядовом посеве развивали в 2–2,5 раза большую корневую систему, чем при широкорядном посеве (табл. 1.3).

Таблица 1.3 – Масса корней многолетних бобовых культур при рядовом посеве (1) и широкорядном (2) по профилю почвы, т/га (Абдушаева и др., 2008)

Культура	Глубина, см											
	0–20		20–40		40–60		60–80		80–100		0–100	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Донник белый	8,1	3,1	2,2	1,6	1,7	0,3	0,2	0,2	0,01	0,01	12,21	5,3
Донник желтый	9,2	3,3	3,2	1,8	1,8	0,5	0,3	0,2	0,04	0,04	14,45	5,84
Козлятник восточный	7,6	2,6	1,5	1,4	1,3	0,4	0,05	0,3	0,01	0,03	10,46	4,73
Лядвенец рогатый	7,9	2,9	1,8	1,5	0,5	0,3	0,1	0,1	0,02	0,01	10,32	4,81
Люцерна посевная	6,2	2,5	1,3	1,3	1,0	0,2	0,03	0,2	-	-	8,53	4,2

Наибольшую массу корней в 100-сантиметровом слое дерново-подзолистой почвы формировал донник желтый, наименьшую – люцерна. При этом 90% всех корней располагались в 40-сантиметровом слое почвы. При рядовом посеве 76% корней растений располагались в пахотном слое, тогда как при широкорядном – на 8–10% меньше. На 3-й год жизни наибольшей корневой системой обладал лядвенец; у люцерны происходило утолщение корневой шейки и основное количество корней располагалось в 30-сантиметровом слое почвы.

**Нут** – высококачественный источник получения пищевого белка. В зерне содержится до 31% белка, 4–8% жира, богатого ненасыщенными жирными кислотами, 55–60% углеводов, а также витаминами (А, В, В2, В6, С, РР) и минеральные соли.

Нут – культура длинного дня, требователен к теплу, засухоустойчив. Во влажные годы поражается грибными болезнями (аскохитоз, фузариоз). Растения холодостойкие, всходы выдерживают заморозки до -11 °С. Сильно поражается нутовой мушкой, однако устойчив к зерновке.

Нут возделывают на южных черноземах и темно-каштановых почвах, однако лучшими являются черноземы типичные. Он нетребователен к гранулометрическому составу, хорошо приспосабливается и к легким, и к тяжелым глинистым почвам при их хорошей оструктуренности. Культура экологически пластичная, посевы не полегают, нут не осыпается и не растрескивается при созревании (Балашов и др., 2002). На своих корнях формирует свыше 30 шт./м<sup>2</sup> клубеньков, под действием которых растет фиксация молекулярного азота и содержание белка в зерне (Федотов и др., 2004; Проворов, Воробьев, 2012; Лактионов и др., 2013). Нут является хорошим

предшественником озимой пшеницы. На каштановых почвах использование занятых паров под нутом обеспечивало повышение урожая зерна пшеницы на 2,5 ц/га и содержания клейковины в зерне на 2,8% (Медведев и др., 2010).

**Сераделла.** Однолетнее мелколистное бобовое растение. Влаголюбива, хорошо переносит затенение, поэтому на пониженных местах дает более высокий урожай. Семена сераделлы начинают прорастать уже при 1–2 °С. Хорошо переносит заморозки до -8–9 °С. Сераделла отличается продолжительным периодом цветения, ее охотно опыляют пчелы (Карпук, Сидорова, 2011). Подсевают сераделлу под озимую рожь и яровые злаковые культуры. При выращивании в чистом посеве (на зеленый корм, сено) высевают ранней весной с добавлением овса (20 кг/га), чтобы избежать полегания. Скашивают растения не ниже 5 см, так как при низком срезе отава отрастает плохо. На сено сераделлу сушат в валках, чтобы сохранить листья от пересыхания. Растение часто называют клевером песчаных почв. Сераделла – это универсальная культура: ее используют на сено, зеленый корм, силос и выпас животных. Идеальна для выращивания на легких по гранулометрическому составу почвах, на которых сераделла формирует 300–500 ц/га зеленой массы и 7–12 ц/га семян.

**Соя.** Соя – растение короткого дня; для полного развития ей необходима сумма активных температур 1700–3200 °С. Хорошо переносит недостаток влаги в начальный период развития, однако в период цветения и налива семян страдает от недостатка влаги. Светолюбива. Благоприятные условия для ее роста складываются в период муссонных дождей (много тепла, влаги и света).

Количество фиксируемого соей атмосферного азота за время вегетации колеблется от 40 до 180 кг N/га. Недостаток влаги тормозит образование клубеньков. Оптимально они функционируют при влажности почвы 40–80% НВ. При избытке влаги интенсивность фиксации азота снижается вследствие недостатка кислорода для клубеньков. Активно фиксация азота идет при температуре 10–13 °С, достигая максимума при 24–25 °С.

Соя хорошо растет на глинистых почвах, среднегумусных лесных, черноземах, осушенных торфяниках, то есть на почвах, богатых органическим веществом, с нейтральной реакцией среды. Она не выдерживает сильнокислых, сильнозасоленных и заболоченных почв. Максимальное количество и масса клубеньков сои в условиях черноземов формируется, если влажность почвы не опускается ниже влажности разрыва капилляров (Завалин, Кашуков, 1998). Нижним пределом оптимальной обеспеченности чернозема выщелоченного (Предкавказье) подвижным фосфором для сои считается 25 мг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/кг (по Мачигину).

При выращивании сои на лугово-бурых оподзоленных почвах (обладающих низкой азотминерализующей способностью) она в начале своего роста испытывает нехватку азота, то есть в период, когда идет интенсивное развитие корневой системы и формирование клубеньков. В этот период происходит отток ассимилятов в клубеньки, поэтому затормаживается рост надзем-

ных органов. Однако подкормка растений сои минеральным азотом не дает эффекта, поскольку вызывает депрессию в развитии клубеньков и снижение фиксации азота (Неунылов, Слабко, 1968). При предпосевном внесении азотного удобрения (кальциевая селитра, меченная  $^{15}\text{N}$ ) соя использовала 60% азота удобрения от применяемой дозы. При проведении подкормки в период бутонизации соя использовала 86% азота удобрения. Столь высокий показатель объясняется тем, что исследования проводили в условиях вегетационного опыта (Смирнов, 1977).

**Фасоль.** Наиболее распространены следующие виды фасоли: обыкновенная, многоцветковая, остролистная (тепари), лимская (лунообразная), золотистая. Фасоль обыкновенная – культура короткого дня, теплолюбива, не выдерживает заморозков. Влаголюбивое растение, критический период – налив семян. Семена начинают прорастать при 8–10°C, оптимальной для прорастания семян скороспелых сортов фасоли является температура 20°C. Фасоль наименее устойчива к низким положительным температурам, ее всходы гибнут при -0,5–1°C. Оптимальная температура в период бутонизации – цветения – 20–25°C. Для произрастания фасоли необходима сумма активных температур 1300–1780°C. До бутонизации фасоль способна выдерживать засуху, для нее губителен избыток влаги в почве. Требовательна к свету, особенно на ранних этапах развития. Способна поднимать и опускать листья, регулируя использование света.

Хорошо растет на нейтральных, слабокислых и слабощелочных почвах ( $\text{pH}_{\text{сол}}$  6,0–7,0). Для фасоли благоприятны суглинистые почвы всех типов: оструктуренные черноземы, тяжело- и легкосуглинистые. Слитые почвы она переносит плохо, не переносит засоленные, а также высокий уровень стояния грунтовых вод.

**Чечевица.** Выращивают два подвида чечевицы: крупносеменную (тарелочную) и мелкосеменную. В состав зерна входит: 18–30% белка; 2,2–3,1% жира; 41–50% безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ); 6–7% клетчатки; 4,2–6,2% золы. Средняя масса 1000 семян составляет 35,5–43,8 г. Урожай семян чечевицы колеблется в пределах 7–16 ц/га. Она теплолюбива, оптимальная температура для ее роста – 19–20 °C. Чечевица отличается медленным ростом вегетативных органов в начале вегетации и усилением ростовых процессов к началу цветения. Темпы роста и развития растений в сильной степени зависят от температуры и влажности почвы. Продолжительность периодов: всходы – цветение – 38 суток, цветение – созревание – 45 суток. Наибольшей общей адаптивной способностью отличаются сорта чечевицы Сюрприз и Орлея. Число и масса клубеньков у разных сортов чечевицы достоверно теряются при втором и третьем сроках сева. Наибольшее количество сырого белка в семенах (26,6–27,2%) содержат сорта чечевицы Веховская, Орлея, Сувенирная. Семена сортов Любимая, Орлея, Сувенирная, Рауза отличаются высокими вкусовыми свойствами, они требуют меньше времени для варки. Чечевица предпочитает рыхлые супесчаные и суглинистые почвы с нейтральной реакцией среды. Страдает от сорняков из-за медленного роста в начале вегетации.

**Чина.** Это продовольственная и кормовая культура. На корм животным используют зеленую массу и сено. Чина перспективна для засушливых районов, где она урожайнее других зерновых бобовых культур.

Растение с трехгранным полегающим стеблем до 1 м в высоту. Семена чины прорастают при температуре 2–3 °С, всходы выдерживают заморозки до -5–6 °С. Сумма активных температур – 1700 °С. Период вегетации – 80–100 дней. Растения обладают высокой засухоустойчивостью и солевыносливостью. Чина не повреждается брухусом, слабовосприимчива к гороховой зерновке, но во влажные годы поражается ржавчиной и аскохитозом. Созревание чины происходит равномерно, плод – прямой, плоский, нерастрескивающийся, масса семян – 100–400 г.

Чина нетребовательна к почвам, она хорошо растет на легких супесчаных и глинистых, но не на переувлажненных. Лучше всего – на черноземах.

**Эспарцет.** В культуре используют три вида эспарцета: закавказский, виколистный и песчаный. Это культура длинного дня, зимостойкая. Листья обладают повышенной холодостойкостью, не погибают при температуре -12 °С. Эспарцет – типичный ксерофит, засухоустойчив; транспирационный коэффициент составляет 300–400 (у люцерны в тех же условиях – 500) (Вавилов, 1979). Он максимально потребляет воду в период бутонизации – цветения, плохо переносит затенение покровной культурой. Имеет мощную корневую систему, способную поглощать труднодоступные фосфорные и кальциевые соединения. В разных почвенно-климатических условиях на одном месте растет 3–5 лет, на хорошо дренированных почвах сохраняется до 8–10 лет (Слабодяник и др., 2011). В засушливых регионах эспарцет песчаный формирует 17–49 т/га зеленой массы и 5–7 т/га семян (Панков, 2012; Сагалбеков У., Сагалбеков Е., 2012). В орошаемых условиях превосходит люцерну по продуктивности на 20–25%. При своевременном скашивании дает зеленую массу с содержанием 13,8–19,2% сырого белка (Сафин, Зотов, 2009). Скармливание свежей зеленой массы не вызывает тимпанита у животных.

Эспарцет возделывают на карбонатных, маломощных почвах легкого гранулометрического состава: его выращивают для восстановления плодородия рекультивируемых земель. Растение обладает слабой солевыносливостью, не выдерживает кислых почв с избыточным увлажнением.

**Выводы.** Благодаря своим универсальным биологическим свойствам бобовые растения являются уникальными средообразующими культурами. Обладая мощным пулом биологического азота, они стабилизируют круговорот веществ (и в первую очередь азота) в системе «почва – растение», повышая устойчивое развитие агроэкосистем.

Бобовые растения относятся к культурам длинного дня. Они влаголюбивы. Ряд культур обладают засухоустойчивостью (донник, люцерна, нут, лядвенец, эспарцет). Из-за медленного роста козлятника качевича страдает от сорняков. Клевер и сераделла теневыносливы и хорошо растут под покровной культурой.

Большинство бобовых культур хорошо растут на почвах с высоким содержанием органического вещества и близким к нейтральному значению

рН почвенного раствора. Ряд бобовых культур (люпин, сераделла, лядвенец, чечевица, эспарцет) успешно возделывают на малоплодородных легких песчаных и супесчаных почвах. Некоторые культуры (вика, донник, клевер, козлятник, люцерна, соя) не выносят кислых и заболоченных почв. Люпин, вика, соя – засоленных. Люцерну используют для реабилитации засоленных почв. На одном месте в течение 5–10 лет возделывают люпин многолетний, люцерну, эспарцет.

Бобовые растения отличаются уникальной способностью аккумулировать атмосферный азот. Большинство из них (за исключением люпина) растут на плодородных почвах с нейтральной реакцией среды. Ряд культур (люпин, сераделла, лядвенец, чечевица, эспарцет) возделывают на легких песчаных и супесчаных почвах.

Бобовые растения (донник, эспарцет, бобы) – прекрасные медоносы.

## Глава 2. Молекулярные механизмы и размеры фиксации азота

### 2.1. Молекулярные механизмы азотфиксации

В основе понимания взаимоотношений растений и микроорганизмов на молекулярном уровне лежит выполнение целого ряда задач:

- решение фундаментальных вопросов взаимодействия микро- и макроорганизмов;
- понимание молекулярных механизмов процессов, протекающих в живых системах;
- поиск и разработка путей направленного регулирования растительно-микробных взаимодействий;
- создание эффективных и экологически безопасных сообществ в прикорневой зоне.

Формирование азотфиксирующих систем основано на функционировании молекул белковой природы – агглютининов (лектинов). В основе механизма «узнавания» лежит лектин-углеводное взаимодействие. Оно является сложным процессом, затрагивающим комплекс поверхностных и внутриклеточных молекулярных структур не только растений, но и бактерий (Карпунина, 1995; Никитина и др., 1996; Dufrene, Rouxhet, 1996; DeToch, Vanderleyden, 1996). Молекулярный механизм азотфиксации так же сложен и многомерен.

Формирование и функционирование симбиотических систем невозможны без молекулярных отношений между их партнерами. Так, лектины бобовых растений обеспечивают специфическое взаимодействие партнеров для формирования высокоспециализированных клубеньковых симбиотических систем (Кретович, 1980; Мишустин, 1985; Трепачев, 1999; Проворов и др., 2002).

Лектины бобовых связывают клетки тех ризобий, которые обеспечивают формирование симбиоза с данным растением. Выделен ряд соединений (флавоноиды и Nod-факторы), обеспечивающих узнавание партнеров. Лектины в клетке выполняют двойную роль: обеспечивают специфическую связь с клетками-мишенями или играют роль биологически активного вещества (Антонюк, 2005). От содержания леггемоглобина (фитоглобина) существенно зависят активность и эффективность клубеньков. В свою очередь содержание фитоглобина зависит от условий питания и сорта растения (табл. 2.1.1).

При внесении азотных удобрений (30 кг N/га) подавляется синтез фитоглобина в клубеньках сорта клевера ВИК-7 и прекращается полностью у

сорта Тетраплоидный ВИК (Трепачев, 1999). При внесении азотных удобрений в дозе 120 кг N/га подавляется синтез фитоглобина у обоих сортов, что свидетельствует об отсутствии симбиотрофного питания клевера азотом. При этом форма бактериоида соответствует ранней стадии старения клубеньков, процесс азотфиксации приостанавливается, растения переходят на автотрофный тип азотного питания

Таблица 2.1.1 –Влияние минеральных удобрений на содержание фитоглобина в клубеньках клевера, мкг/г сырой массы (Трепачев, 1999)

Вариант	Сорта	
	ВИК-7	Тетраплоидный ВИК
Без удобрений	577+-44	495+-66
PK	322+-14	466+-164
N30PK	256+-0	фитоглобина нет
N120 PK	фитоглобина нет	фитоглобина нет

По своей природе агглютинины, выделенные из штампов *Rhizobium* и *Paenibacillus*, являются гликопротеинами (R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> и R<sub>3</sub> молекулярным весом 47,45 и 43 кДа соответственно). В их составе находится большее количество кислых аминокислот и отсутствует цистин. В состав углеводного компонента входят глюкоза, галактоза, манноза и глюкозамин. Лектины являются также гликопротеинами с большими молекулярными массами (72 и 69 кДа). В их составе нет серосодержащих аминокислот. Характерным является равномерное распределение агглютинирующих белков по всей поверхности бактериальной клетки.

Азоспириллы содержат несколько лектинов, как поверхностных, так и внутриклеточных (Чернышева и др., 2005; Цивилева и др., 2005). Молекулярная масса лектинов в различных штаммах азоспирилл составляет 36–43 кДа, и они относятся к гликопротеинам. В углеводной части лектинов содержатся глюкоза, галактоза, арабиноза и глюкозамин. В составе лектинов преобладают кислые аминокислоты и отсутствуют серосодержащие. Лектины азоспирилл локализованы на поверхности бактериальных клеток. Активность лектинов бактерий растет при неблагоприятных условиях для их роста. При высокой концентрации азота в среде у азоспирилл полностью исчезала гемагглютинирующая способность, что вызвано подавлением их углеводосвязывающих свойств (центров).

Агглютинины способны выполнять функцию адгезинов и играют важную роль в прикреплении клеток ризобий к корням гороха (Карпушина и др., 1996). Кроме того, при взаимодействии бактерий с макропартнерами существуют неспецифические связи.

Бактериальные клетки азоспирилл с выраженной лектиновой активностью обладают более высокой адгезивностью, чем не активные, по  $\Gamma_m$  клетки (Чернышева и др., 2005; Цивилева и др., 2005). Неактивные клетки азоспирилл характеризуются наибольшей гидрофобностью, поскольку для активных по  $\Gamma_m$ -клеток гидрофобная адгезия является менее важным механизмом.

Во взаимодействии агглютининов и лектинов с фракциями корней гороха и пшеницы принимают участие белки ризобий R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub>, Л I и Л II и эк-

зокомпоненты и фракции мембран проростков, то есть при взаимодействии участвуют белок-белковые связи бактериальных лектинов с компонентами корней растений (агглютинин ризобий с лектином гороха и лектин бацилл с лектином пшеницы). Белок ридагезин на поверхности бактерий семейства *Rhizobiaceae*, который участвует в прикреплении к корневым волоскам бобовых культур, принимает участие также в прикреплении к корневым волоскам однодольных растений (пшеница, ячмень) (Smit et al., 1989). Таким образом, взаимодействие растения с бактериями является многоступенчатым процессом с образованием лектин-углеводных и лектин-лектиновых связей (рис. 2.1.1).

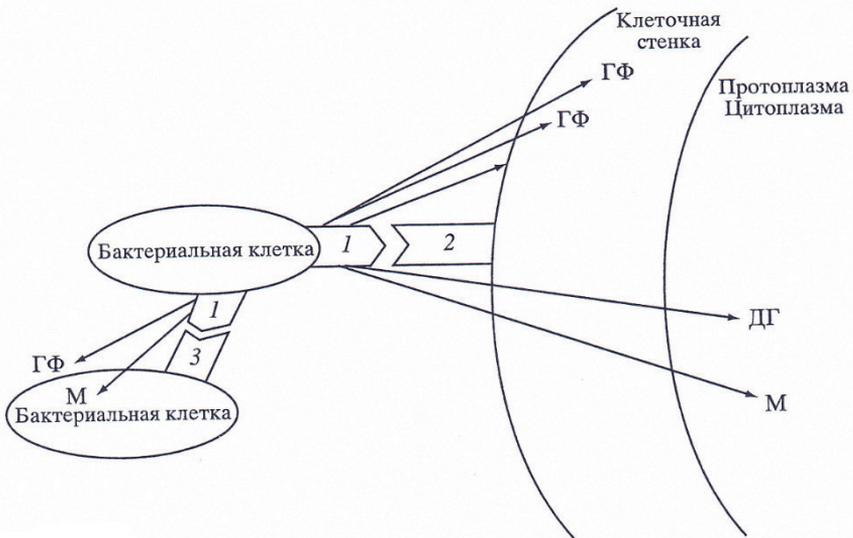


Рисунок 2.1.1. Схема возможного взаимодействия агглютининов (лектинов) азотфиксирующих бактерий с растениями и почвенными бактериями в прикорневой зоне при образовании азотфиксирующих сообществ (Карпунина, 2005): 1 – агглютинины (лектины); 2 – рецепторы растений углеводной или белковой природы; 3 – рецепторы бактерий (различные полисахаридные комплексы); ГФ – гидролитические ферменты (протеазы,  $\beta$ -глюкозидазы); ДГ – дегидрогеназы; М – мембрана

Выращивание азоспирилл в присутствии нитрата приводит к снижению адгезии почвенных азотфиксирующих бактерий к корням растений. Рассматривается двухступенчатый механизм адсорбции: первая стадия – стадия «заякоривания»; вторая стадия – адсорбция за счет экстрацеллюлярных полисахаридов в течение длительного времени (8–16 ч) (Michiels et al., 1990). Лектины азоспирилл способны образовывать агрегаты за счет связывания только со своими (собственными) экзополисахаридами. Азоспириллы образуют два типа ассоциаций: внутриорганизменную и поверхностную (Dobereiner, Pedrosa, 1987).

Лектины различных штаммов азотфиксирующих бацилл и агглютинины ризобий обладают ферментативной активностью. В молекуле лектина име-

ется два центра, один из которых отвечает за ферментативную активность, а второй – за лектиновую. Последний состоит из 2–4 сайтов связывания с углеводами. Характер функционирования этих центров зависит от расстояния между ними. Агглютинины обладают протеолитической,  $\beta$ -глюкозидазной, пектинолитической активностью, а также активностью кислой и щелочной фосфатазы.

Процесс взаимодействия бактерий с растениями начинается с муцигелекорневых волосков (Chaboud, Rougier, 1984; Moody et al., 1988). Взаимодействие лектинов бацилл с углеводной фракцией экзокомпонентов приводило к изменению их ферментативной активности. Взаимодействие агглютининов ризобий с углеводной частью фракции экзокомпонентов сопровождалось увеличением  $\beta$ -глюкозидазной и снижением протеолитической активности (Карпунина и др., 2004; Карпунина, 2005).

Формирование систем азотфиксации предусматривает структурное и функциональное взаимодействие бактериальной и растительной клеток. Так, в гидролизе клеточной стенки растения активное участие принимают гидролитические ферменты растения – хозяина и почвенных бактерий (Авакумова, Арутюнян, 1987; Скочинская и др., 1990). Ризобияльные агглютинины повышали активность гидролитических ферментов корней проростков гороха. При этом протеолитическая активность увеличивалась в 1,7–1,8 раза.

Агглютинины ризобий взаимодействуют с дыхательными ферментами цитоплазматической мембраны растительных клеток. Повышение активности сукцинатдегидрогеназы связывают с увеличением функциональной активности митохондрий, которая локализована на их внутренней мембране (Игамбердиев, Фаллалеева, 1994).

Ассоциативные бактерии облегчают существование симбиотических клубеньковых бактерий (Marek-Kozaczuk et al., 2000). Многие представители *Pseudomonas*, *Azospirillum* и другие продуцируют соединения, подавляющие рост патогенной микрофлоры (антибиотики, токсины), а также способствуют возникновению у растений-партнеров индуцированной системной устойчивости, обеспечивающей защиту от фитопатогенов (Whipps et al., 2001; Cartilaux et al., 2003).

Важную роль в повышении устойчивости растений к болезням играют эндофиты – группы бактерий, обитающих во внутренних тканях растений (Иванчина и др., 2008; 2009). Однако о влиянии эндофитов на бобово-ризобияльный комплекс и устойчивость бобовых растений известно мало. Эндофитные бактерии *B. subtilis* подавляли рост фитопатогенного гриба *F. oxysporum* ингибировали рост культуры клеток *Rh. leguminosarum*. Подавление роста проростков гороха бациллами, по-видимому, связано с выделением штаммами индоллов. Система *Rh. leguminosarum* и *B. subtilis* усиливала рост корней гороха вследствие увеличения содержания ИУК и снижения количества АБК. При этом растет количество клубеньков, снижается поражение растений корневыми гнилями, увеличивается продуктивность гороха.

При взаимодействии азотфиксирующих микроорганизмов с растением наблюдается ряд последовательных процессов (Карпунина, 2002):

- прикрепление клеток бацилл по всей поверхности корня пшеницы;
- прикрепление клеток бацилл к корневому волоску полярно;

- скопление бактериальных клеток на кончике корневого волоска;
- разрыхление клеточной стенки корневого волоска;
- проникновение клеток бацилл внутрь корневого волоска.

Проникновение бактерий в корень связывают с активностью ферментов, в первую очередь гидролитических, лектанов бацилл и агглютининов ризобий. Таким образом, агглютинирующие белки симбиотических и ассоциативных бактерий играют полифункциональную роль при взаимодействии с растениями.

Растворы лектинов исследуемых штаммы азоспирилл, кроме *A. lipoferum* 43 (концентрация 500 мкг/мл), подавляют прорастание семян пшеницы (Чернышева и др., 2005; Цивилева и др., 2005). При концентрации в 10 раз меньше (50 мкг/мл) лектины *A. brasilense* стимулировали прорастание семян пшеницы, тогда как лектин *A. lipoferum* продолжал подавлять данный процесс.

Важную роль в симбиозе эубактерий *A. brasilense* с растениями играет фитолектин агглютинин зародышей пшеницы (АЗП). При воздействии АЗП возникает не менее 12 эффектов в клетках *A. brasilense* Sp. 245, в том числе самостоятельные процессы (азотфиксация, биосинтез ИУК, синтез глутаминсинтетазы), а также рост бактерий, неспецифическое усиление биосинтеза белков (Антонюк, 2005). К краткосрочным ответам на воздействие АЗП относятся:

- индукция новых биосинтетических программ;
- укрупнение клеток;
- индукция азотфиксации;
- усиление транспорта аммония из клетки;
- изменение соотношения кислых фосфолипидов, фосфатидилглицерина и фосфатидилхолина в мембранах бактерий;
- усиление экспонирования поверхностных полимеров с гемагглютинирующей активностью;
- увеличения синтеза поверхностно ассоциированного гемолитического фактора.

При взаимодействии пшеницы с эпифитной микрофлорой зерновки и почвенными микробами АЗП включается в ряд следующих процессов:

- стимуляция роста азоспирилл;
- переключение метаболизма азоспириллы с несимбиотического на симбиотический;
- адсорбция азоспирилл на корнях;
- участие в агрегации азоспирилл;
- взаимодействие с хитинсодержащими фитопатогенами.

Таким образом, лектин пшеницы служит фактором коммуникации в симбиозе азоспирилл с растениями, а углевод-белковое взаимодействие необходимо:

- для физического контакта азоспирилл с корнями растения;
- для контакта азоспирилл друг с другом (агрегация);
- для реализации АЗП в симбиотической системе своего «информационного потенциала» при действии как БАВ для азоспирилл.

Уникальность биологической фиксации состоит в том, что в естественных условиях (природный реактор) молекулярный азот восстанавливается до ам-

миака. На следующем этапе происходит восстановительное аминирование кетокислот (акцепторы аммиака) – основной путь синтеза аминокислот.

В процессе фотосинтеза углерод ( $^{14}\text{CO}_2$ ) в первую очередь включается в пировиноградную, оксипировиноградную и глиоксилевую кислоты, а затем в кетоглутаровую и щавелевоуксусную (Кретович и др., 1963, 1967, 1994). В процессе аминирования образуются первичные аминокислоты: глутаминовая, аспарагиновая, аланин, цитруллин, аргинин, амиды.

Процесс азотфиксации осуществляется с участием фермента нитрогеназы. В функционировании нитрогеназы важную роль играют переносчики электронов – ферредоксины (Лихтенштейн и др., 1978). Для восстановления азота до аммиака необходимы ионы магния, АТФ и приток электронов. В анаэробных условиях АТФ и электроны поставляются брожением, если в процессе принимают участие фотосинтетики, АТФ и электроны – фотосинтезом, а в аэробных условиях – дыханием.

Под действием нитрогеназы при участии АТФ происходит превращение ионов водорода в молекулярный водород (Жизневская и др., 1985). «Биологическим топливом» образования АТФ является поли- $\beta$ -оксимасляная кислота (ПОМ), в которую включается  $^{14}\text{C}$ , ассимилированный листьями растения. Основная функция ПОМ состоит в регуляции потоков фотоассимилятов, поступающих к нитрогеназе.

Между фиксацией азота в клубеньках и процессами фотосинтеза растения существует положительная связь (Корягин, 1980; Ягодин и др., 1982; Кретович, 1994; Посыпанов и др., 1988). Бобовые растения на каждый 1 мг усвоенного бактериями азота расходуют 5–7 мг углерода (Романов, 1985). При этом на восстановление  $\text{NO}_3^-$  расходуется до 20% энергии, накопленной при фотосинтезе. Масса клубеньков на корнях растет пропорционально увеличению площади листьев и скорости накопления продуктов фотосинтеза (Мильто, 1982). При переходе на симбиотрофное питание в листьях растений возрастает в два раза содержание сахаров (Пигарева, 1990). Под действием высокой интенсивности света увеличивается масса клубеньков, растут фиксация азота и количество хлорофилла в листьях (Алисова, Тихонович, 1983; Антипчук, 1985, 1990; Дубовенко, 1989; Петерсон, 1991, 1994).  $^{14}\text{C}$  углекислого газа, ассимилированный листьями, поступает в клубенек и включается прежде всего в сахарозу и продукты ее расщепления (глюкозу и фруктозу) (Кретович, 1994).

Наиболее отчетливо связь между симбиотической азотфиксацией и фотосинтетической деятельностью у бобовых прослеживается в период укосов (уборка трав). Так, после 1-го укоса люцерны клубеньки лишаются основного источника энергии, в них происходят структурные и функциональные изменения: уменьшается масса (в 1,8–2 раза); разрушаются клетки, содержащие бактериоды; снижается количество бактериодов; падает содержание белка и леггемоглобина; снижаются нитрогеназная активность и азотфиксация (в 8–25 раз); растет активность нитратредуктазы (НРА) (Трепачев, 1999).

По мере отрастания надземных органов люцерны идет восстановление азотфиксирующей активности (на 18-й день после 1-го укоса), хотя при этом продолжается снижение массы клубеньков вплоть до 2-го укоса. Уменьшается также количество фиксированного азота на единицу площади.

Режимы скашивания (также, как и экологические условия, состав агрофитоценоза) влияют на долгодетие использования травостоев (для укосного использования люцерну, для пастбищного – клевер) (Laidlaw, Teuber, 2001). Долгодетней считается люцерна, даже на бедных песчаных почвах, тогда как долгодетие клевера не превышает трех лет (Новоселова, 1986; Привилова, 2004; Шамсутдинов и др., 2007; Лазарев и др., 2016, 2017). Длительное время на одном месте растут: лядвенец – 5 лет, люпин многолетний – 8–10, козлятник – 20 лет.

Наибольший урожай злаки и люцерна формировали в первый шестилетний период при двухукосном содержании посевов (табл. 2.1.2).

Таблица 2.1.2– Урожайность сухой массы долгодетних травостоев, т/га (Лазарев и др., 2017)

Травостой	Годы			Среднее за 18 лет
	1997–2002	2003–2008	2009–2014	
Злаки (кострец, тимофеевка)	3,7	4,1	2,4	3,4
	3,2	3,2	2,0	2,8
Люцерна изменчивая (Пастбищная 88)	9,3	8,3	3,4	7,0
	8,0	6,6	3,1	5,6
Люцерна (Пастбищная 88) + злаки	9,6	8,0	3,6	7,1
	7,4	5,8	2,9	5,4

Примечание: в числителе – двухукосное использование; в знаменателе – трехукосное.

В дальнейшем урожай культур снижался, хотя люцерна формировала больший урожай сена по сравнению со злаками. Уменьшение продуктивности культур в третий период связано с засухой в 2010 г., изреживания посевов люцерны в связи с увеличением поражаемости травостоя болезнями (Лазарев и др., 2017). Главное же в долгодетии люцерны – эффективность (устойчивость) ризобиального комплекса.

Еще более тесная связь между фотосинтезом и азотфиксацией установилась при ассоциативном взаимодействии микроорганизмов и растений. Так, на обеспечение энергией ассоциативной азотфиксации расходуется 25–37% углерода, потребляемого рисом в процессе фотосинтеза (Yoshida, 1977). Субстратом для азотфиксаторов служат корневые выделения (экзосмос) и корнеопад. Количество органических веществ, поступающих в почву в течение периода вегетации растений (исследования с применением  $^{14}\text{CO}_2$ ), составляет 25–49 г/100 г массы корней (Shamoot et al., 1968). В течение периода вегетации озимой пшеницы в процессе экзосмоса и корнепада в почву поступают органические вещества ( $^{14}\text{CO}_2$ ) в 3–4 раза больше, чем с корневой массой (Sauerbeck et al., 1982) Количество и состав корневых эксудатов существенно зависят от вида культуры и условий ее выращивания (табл. 2.1.3).

Таблица 2.1.3– Размеры и состав корневых эксудатов растений (Умаров, 1986)

Растения	Состав	Размеры
Пшеница	– полисахаридный муцигель и корневой опад; – нерастворимые и растворимые вещества; – дыхание почвы по $^{14}\text{CO}_2$	– 700 м <sup>3</sup> /га • год; – 80% от содержания Собщ в корнях; – 35–50% от общей продукции фотосинтеза
Кукуруза	углеводы и органические кислоты	10–5% от общей продукции фотосинтеза

Общее количество органических углеродсодержащих веществ, поступающих в ризосферу в период активного роста растений, достигает 1/3 от продукции фотосинтеза (Умаров, 1986). Межорганизменный обмен метаболитами в результате экзосмоса является экологически целесообразным процессом, процессом мобилизации элементов питания (в первую очередь азота) за счет активизации процессов азотфиксации. Активизация процессов азотфиксации тесно связана с поглотительной деятельностью корневых систем растений, что приводит к усиленному оттоку азотсодержащих метаболитов бактериальных клеток и усилению активности нитрогеназы. Несмотря на высокую азотфиксирующую активность, в результате быстрого переноса азотсодержащих веществ из бактериоида в ткани растения содержание азота в бобово-ризобиальном комплексе остается на низком уровне. Благодаря этому в системе поддерживается высокая активность нитрогеназы, что обеспечивает экологическую целесообразность взаимодействия организмов.

Симбиотическая азотфиксация требует больших затрат энергии: для связывания одного моля атмосферного азота необходимо 730–960 кДж энергии. За период вегетации из общего количества ассимилятов бобового растения клубеньковые бактерии используют 13–23%: на дыхание приходится 35–63%, на рост – 9–22%, на синтез и трансформацию азота – 21–52% (Dravon, Moyse, 1990; Killham, Fester, 1992; Vasilyeva, Kostov, 2001). Для фиксации одной молекулы азота используются 15–20 молекул АТФ.

У растений сои и фасоли с клубеньками интенсивность фотосинтеза на 15–30% выше, чем у растений без клубеньков (Вавилов, Посыпанов, 1983; Посыпанов, 1991). Интенсивность дыхания корней таких растений также тесно связана с массой клубеньков: у корней сои с клубеньками интенсивность дыхания оказалась в 5–6 раз выше, чем без клубеньков. Интенсивность фотосинтеза, активность нитрогеназы и содержание леггемоглобина у сои достигали максимума в период цветения, у фасоли – в фазу роста бобов. Падение интенсивности фотосинтеза вызывает снижение активности нитрогеназы и уменьшение содержания леггемоглобина.

Активность азотфиксации меняется в течение суток (Шотт, 2003; Назарюк, 2007). Низкой активностью нитрогеназы в ризосфере зерновых и зернобобовых культур в фазу кущения и цветения обладала в 6 ч. Нарастание ее активности идет к 15 ч (кущение) и 18 ч (цветение). У гороха интенсивность процессов азотфиксации в фазу бутонизации оказалась в 1,5–3 раза выше, чем в фазу цветения.

## 2.2 Размеры симбиотической и ассоциативной фиксации азота

Высшие растения в естественных условиях обитания не могут поддерживать свое функционирование без микроорганизмов. Микрофлора отдельно взятого растения состоит из консорциума разнообразных организмов. Среди микробов-фитокolonизаторов выявлены представители трех доменов: эукариот, эубактерий и архей (Проворов и др., 2002; Nicol et al., 2003). Весомый вклад в рост и развитие растений вносят клубеньковые бактерии, микоризообразующие грибы и эубактерии рода *Azospirillum*. В настоящее

время наиболее изученными являются два рода археобактерий, 38 родов бактерий и 29 родов цианобактерий, обладающих азотфиксирующей способностью (Кретович, 1994; Rowe et al., 2004).

В симбиозе с бобовыми растениями в фиксации азота участвуют бактерии родов *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Clostridium*, *Beijerinckia*, некоторые актиномицеты (*Frankia*) и цианобактерии (Dixon, Wheeler, 1986). Ассоциативный тип азотфиксации обнаружен у более 12 тыс. различных видов высших растений (Умаров, 1982; Кретович, 1994). На сегодня выделено свыше 50 видов азотфиксирующих бактерий, относящихся к 12 семействам. Активные штаммы ассоциативных азотфиксаторов относятся к родам *Achromobacter*, *Agrobacterium*, *Arthrobacter*, *Azospirillum*, *Azobacter*, *Aquaspirillum*, *Chromobacterium*, *Clostridium*, *Enterobacter*, *Flavobacterium*, *Klebsiella*, *Rhodospirillum*, *Xanthobacter* (Giller, 1984; Naahtela, 1984; Sprent, Gehlot, 2011; Andrews et al., 2011; Dijkstra et al., 2015; Denk et al., 2017).

В настоящее время проблема биологического азота стоит наиболее остро. Это связано с вопросами повышения плодородия почв экологически безопасными путями (для создания комфортных условий выращивания сельскохозяйственных культур), чтобы снизить пресс от применения минеральных удобрений, получить экологически безопасную продукцию (в том числе белка в кормах и продуктах питания). Азотфиксация является экологически безопасным процессом вовлечения свободного азота атмосферы в круговорот веществ и энергии на Земле. Круговорот азота представляет собой диалектическое единство процессов синтеза и распада веществ в ходе перемещения этого элемента между живыми и неживыми, органическими и неорганическими фондами трех фаз планеты.

Общепланетарный запас азота составляет  $2,170 \cdot 10^{17}$  т, при этом в литосфере локализовано  $2,127 \cdot 10^7$  т, в атмосфере  $0,425 \cdot 10^{16}$  т и в биосфере  $1,804 \cdot 10^{11}$  т. В различных объектах биосферы содержится 150 млрд т азота, в том числе в органических соединениях почвенного покрова  $1,5 \cdot 10^{11}$  т, в биомассе растений –  $1,1 \cdot 10^9$  т, в биомассе животных –  $0,1 \cdot 10^7$  т (Ковда, 1975).

В глобальном масштабе в растениях накапливается 1400 млн т азота (Paul et al., 1988). При этом симбиотическая фиксация азота составляет 120 млн т, ассоциативная и свободноживущими организмами – 50 млн т. Основное количество азота у небобовых растений составляет 65–75% и накапливается за счет почвенных запасов (минерализация азота почвы достигает 3500 млн т), тогда как у бобовых культур азот составляет лишь 15–20%. Общее количество биологически фиксируемого азота в масштабе планеты оценивается в  $10^{10}$  т в год (Postgate, 1974). По другим данным, размеры азотфиксации в наземных экосистемах составляют около 175 млн т в год, из которых примерно 90 млн т фиксируется свободно живущими азотфиксаторами (Venkataraman, 1982). На планете Земля биологическим путем фиксируется 169–209 млн т азота в год (Бабаева, Зенова, 1989; Осипов, Соколов, 2001).

Важно то, что азотфиксация является экологически безопасным процессом, поскольку исключается загрязнение объектов окружающей среды в отличие от технологий применения технического азота и бесподстилочного навоза.

Стратегию вовлечения биологического азота в земледелие страны преопределил Д.Н. Прянишников (1945): «...Азот технический всегда дороже

азота клевера и азота навоза, потому даже в странах с высокоразвитой промышленностью не ему принадлежит главная роль в снабжении сельскохозяйственных растений азотом, а азоту биологическому; включая сюда и азот навоза, так как в навоз переходит азот клеверного сена. В сущности, биологический путь фиксации азота воздуха является даровым, если все расходы по культуре клевера или люцерны оплачиваются животноводством; чем больше посевов клевера в стране, тем она богаче скотом и навозом, тем меньше страдают урожаи хлебов зерновых культур. Идти комплексным путем: путь технический и путь биологический. Они взаимно друг друга дополняют, но друг друга совсем заменить не могут». (Прянишников, 1951). Введение в севооборот многолетних бобовых трав улучшает баланс азота в земледелии. На каждый 1 ц сена бобовых трав приходится 3 кг симбиотического азота. При этом 2 кг азота содержится в самом сене и 1 кг в корнях и поукосных остатках.

Свыше 90% азота пахотных почв и почти весь запас азота естественных экосистем является азотом, фиксированным из атмосферы симбиотическими, ассоциативными и свободноживущими микроорганизмами. В общем балансе биологического азота основную долю составляет азот, фиксированный клубеньковыми бактериями на корнях бобовых растений, а 1/3 приходится на азот, фиксированный ассоциативными микроорганизмами в ризосфере небобовых растений (Умаров, 1982, 1986; Завалин, 1997, 1998). Биологическая фиксация азота имеет планетарное значение и по своему масштабу сопоставима с фотосинтезом. Использование биологического азота снижает затраты на производство и применение азотных минеральных удобрений, существенно уменьшает загрязнение азотсодержащими соединениями различных компонентов окружающей среды (почв, растений, природных вод и атмосферы).

Потенциальные размеры симбиотической азотфиксации могут достигать 130–390 кг N/га для зернобобовых культур и 270–550 кг N/га для многолетних бобовых трав (Кожемяков, Доросинский, 1989; Трепачев, 1999; Кокорина, Кожемяков, 2010). За счет симбиотической азотфиксации горох, вика, чина и пелюшка могут фиксировать до 150 кг N/га; клевер, соя, бобы, люпин – до 250, а козлятник, люцерна – свыше 300 кг N/га (табл.2.2.1).

Таблица 2.2.1 –Размеры фиксации азота бобовыми растениями (Завалин, Соколов, 2016)

Растения	Потенциальная продуктивность азот-фиксации, кг/га	Коэффициент азот-фиксации, %	Величина азотфиксации, кг/га
Горох	140	66	40–60
Вика посевная	160	0	40–70
Нут	210	75	40–80
Соя	390	88	60–90
Люпин	220	81	80–120
Клевер	310	87	120–180
Эспарцет	270	80	110–160
Люцерна	550	88	140–210
Козлятник	510	91	140–240

Некоторые небобовые растения также способны образовывать клубеньки и вступать в симбиоз. Так, за счет симбиотической азотфиксации накопление азота достигает: у осоки безжилковой – 87, вейника лапландского – 26, колосовидного – 23 кг N/га (Родынюк, Клевенская, 1977).

Для определения величины фиксации молекулярного азота прямым методом растения люпина желтого помещали в камеру, в которую подавали N<sub>2</sub>, меченный <sup>15</sup>N (Логинов, 1966). Из накопленного азота в наземных органах растений 66% накапливалось за счет азота, усвоенного из атмосферы (табл. 2.2.2).

Таблица 2.2.2 – Количество атмосферного азота (меченного <sup>15</sup>N), фиксированного люпином за период выращивания в газовой среде (Логинов, 1966)

Единица измерения	В надземной массе			В корнях			Во всем растении		
	всего	из атмосферы	из почвы	всего	из атмосферы	из почвы	всего	из атмосферы	из почвы
мг/сосуд	97	64	33	65	22	43	162	86	76
%	100	66	34	100	3	66	100	53	47

В корнях на долю азота атмосферы приходилось 34%. Потребляемый люпином азот распределялся между органами в другом соотношении: 53% азота из атмосферы и 47% – из почвы.

Количество азота, фиксированного люпином из воздуха (процент от общего азота в растениях), зависит от применяемого метода:

- метод «разности» – 79,4;
- метод «метки» – 52,8.

При применении метода «разности» фиксируется азота больше. Это связано с тем, что инокулированные растения используют из почвы азота больше, чем неинокулированные (Тюрин и др., 1962). По методу «баланса» растения фиксируют меньшее количество азота атмосферы (32%) по сравнению с методом «метки». По-видимому, это связано с газообразными потерями азота из почвы.

Бобовые растения фиксируют азот атмосферы и переводят его в соединения, доступные растениям. При их возделывании в почве накапливается лабильное органическое вещество при разложении пожнивно-корневых остатков, формируется эффективное плодородие почвы. За счет пожнивно-корневых остатков бобовых растений в почве создаются условия сохранения или повышения обеспеченности почвы органическим веществом, улучшаются ее физико-химические свойства, оздоравливается фитосанитарное состояние посевов.

Максимальное количество растительных остатков (250–300 ц/га) формируется в процессе выращивания многолетних бобовых трав при орошении, минимальное (8–15 ц/га) – при выращивании нута, чины, сои, вики и бобов (табл. 2.2.3). В зависимости от вида при выращивании бобовых культур в ПКО накапливается следующее количество азота: чина – 10–15, вика, горох, нут – 17–35, люпин, бобы, соя – 19–63, клевер – 49–285, люцерна (при орошении) – 64–786 кг N/га.

Таблица 2.2.3 – Накопление азота в пожнивно-корневых остатках бобовых растений

Растение	Пожнивно-корневые остатки, ц/га	Количество азота, кг/га
Бобы	10–15	19–63
Вика	10–34	26–35
Горох	14–32	17–34
Люпин	25–43	27–50
Люцерна 1 г.п., без полива	32–91	64–207
Люцерна 1 г.п., орошение	75–113	150–28
Люцерна 2 г.п., орошение	122–15	248–584
Люцерна 3 г.п., орошение	184–300	285–786
Люцерна 4 г.п., орошение	167–250	251–658
Нуг	8–12	24–28
Клевер 1–года пользования (г.п.)	29–91	49–178
Клевер 2–года пользования	64–112	96–285
Соя	10–14	19–63
Чина	8–12	10–15

Главная роль, определяющая качество растительных остатков, принадлежит азоту. Растительные остатки делят на две группы: бедные азотом, содержащие меньше 1%, и богатые азотом, в которых его свыше 2% (Станков, 1964). Последние разлагаются быстрее, накапливая значительное количество минерального азота. К группе органических остатков, богатых азотом, относятся биомасса микроорганизмов и остатки бобовых культур.

Разложение растительных остатков сопровождается интенсивным выделением  $\text{CO}_2$ . Его наибольшее количество выделяется в начале этого процесса. При разложении остатков бобовых культур выделяется больше  $\text{CO}_2$  по сравнению с остатками злаковых культур. К десятой декаде процесс разложения остатков бобовых и злаковых культур проходит на одном уровне (Станков, 1964). В течение первого месяца минерализуется 35–60% массы остатков, через три месяца – 50–70%, а к концу года – 63–80% растительной массы (Александрова, Люжин, 1966).

Растительные остатки активизируют деятельность азотфиксаторов. При внесении в почву пшеничной соломы (7,5 т/га) повышается количество биологически связанного азота в урожае гороха и кормовых бобов на 11–12 кг/га (Орлов, 1981). На 1 т соломы, внесенной в почву, дополнительно фиксируется 5 кг атмосферного азота.

Одной из основных задач экологии *ассоциативной азотфиксации* является определение размеров поступления азота в почву за счет деятельности diaзотрофных бактерий в природных условиях и агроэкосистемах. Эффективность использования углерода при процессе связывания атмосферного азота культурами diaзотрофных бактерий колеблется в пределах 3–20 мг  $\text{N}_2/\text{г}$  потребленного углерода (Мишустин, Шильникова, 1968). Факультативно-симбиотрофные микробные ассоциации фиксируют 12–15 мг  $\text{N}_2/\text{г}$  углерода (Калининская и др., 1977). Продуктивность несимбиотической азотфиксации в дерново-подзолистой почве составляет 23,5 мг  $\text{N}_2/\text{г}$  углерода (Умаров, 1986; Adesemoye et al., 2010).

За счет ассоциативной микрофлоры под различными сельскохозяйственными культурами фиксируется следующее количество азота, кг  $\text{N}_2/\text{га}$  сезон (Клевенская, Мозжерин, 1985; Умаров, 1986; Назарюк, 2007):

- ячмень – 12–30;
- рис – 10–80;
- овсяница – 20–26;
- тимофеевка – 20–25;
- картофель – 33–40;
- яровая пшеница – 14–30;
- кукуруза – 40–45;
- кормовые травы – 20–35.

У зернобобовых культур также обнаружена ассоциативная азотфиксация. Интенсификация продукционного процесса сои достигалась комплексным действием симбиотической и ассоциативной азотфиксации: последняя способствовала образованию клубеньков на корнях сои и усиливала симбиотическую азотфиксацию.

Определены ориентировочные нормативы поступления азота за счет ассоциативной азотфиксации (Мишустин, Черепков, 1989):

- в зоне земледелия северной тайги и тундры свободноживущие азотфиксаторы (включая цианобактерии) связывают несколько килограммов азота на 1 га;
- в средней зоне (дерново-подзолистые и серые лесные почвы) – 15–20 кг N/га;
- в черноземах – 30–40 кг N/га;
- в тропиках и субтропиках – до 80 кг N/га.

В природных экосистемах активность ассоциативной фиксации азота выше, чем в агроэкосистемах (табл. 2.2.4). Самым высоким уровнем азотфиксации отличается суходольный луг. Высокий уровень фиксации азота – у ельника и сосняка (20–25 кг N/га). В междурядьях пропашных культур и в почве черного пара интенсивность азотфиксации снижается.

Таблица 2.2.4 – Продуктивность азотфиксации в экосистемах, на дерново-подзолистых почвах (Умаров, 1986)

Почва	Растительность, угодые	Азотфиксация за вегетационный период, кг/га
Дерново-слабоподзолистая	Овсяница	39
	Тимофеевка	40
Тяжелосуглинистая, хорошоокультуренная	Черный пар	13
	Ячмень	40
Дерново-среднеподзолистая	Картофель	30
	Междурядье	10
Дерново-слабоподзолистая среднесуглинистая	Ельник-кисличник	25
	Сосняк-зеленомошник	20
Дерново-слабоподзолистая легкосуглинистая	Березняк разнотравный	19
	Ельник-масличник	28
Дерновая среднесуглинистая	Луг суходольный	55

## 2.3 Агроэкологическая роль бобовых растений в агроландшафте

*Зеленое удобрение в качестве одного из элементов системы удобрения должно стать весьма мощным средством поднятия урожаев и повышения плодородия почвы.*

Д.Н. Прянишников

На основе экологизации и биологизации современного земледелия в рамках высокоточных агротехнологий и сидерации решаются важнейшие задачи охраны окружающей среды от загрязнения и получения экологически безопасной продукции растениеводства и животноводства.

Бобовые сидераты являются важным звеном плодосмена в современных севооборотах, приобретая все большее значение в природоохранных мероприятиях (Сычев и др., 2012, 2017; Sprent, Gehlot, 2011; Andrews et al., 2011).

Экологическое значение бобовых сидеральных культур и бобовых ПКО состоит:

- в повышении плодородия и устойчивости почвы;
- в предотвращении деградации почв;
- в многостороннем действии на химические, физические и биологические свойства почв;
- в эффективном пути секвестирования углерода и снижения количества  $\text{CO}_2$  в атмосфере;
- в источнике формирования органического вещества в почве;
- в снижении газообразных потерь, смыва и вымывания азота;
- в формировании агрегатов и структуры почвы;
- в роли субстрата в жизни микроорганизмов;
- в регулировании мобилизации и иммобилизации элементов питания;
- в факторе экологизации и биологизации земледелия.

Многолетние бобовые растения являются важнейшим фактором сохранения и воспроизводства плодородия почвы в земледелии. Их значение возрастает в условиях острого дефицита органических и минеральных удобрений, а также в связи с экологическим состоянием агроэкосистем. Поэтому бобовые растения являются биологическим фактором, определяющим плодородие почв. Тем не менее в представительной монографии по органическому веществу почвы эти вопросы не обсуждаются вообще (Семенов, Когут, 2015).

Влияние бобовых растений на плодородие почвы затрагивает целый комплекс вопросов: оптимизацию гумусного, питательного режимов, агрохимических и агрофизических свойств; биологическую активность, проблемы экологической направленности (снижение нагрузки за счет применений минеральных удобрений и пестицидов, борьбы с сорняками, болезнями и вредителями, защиты почв от эрозии, предотвращение газообразных потерь азота почвы, предотвращение загрязнения биофилами водных экосистем).

Бобовые растения отличаются большей экологической безопасностью и оказывают более сильное воздействие на воспроизводство плодородия почвы по сравнению с навозом (табл. 2.3.1).

Так, суммарный эффект действия трав оценивается как 8 к 3 в их пользу. При этом эффект действия навоза зависит от продуктивности трав. Энергетическая база плодородия создается за счет биологической фиксации углерода и азота травами.

Таблица 2.3.1– Сравнительное действие навоза и многолетних бобовых трав на воспроизводство плодородия, почвы и экологическую безопасность (Конте, 1983; цит. по: Трепачеву, 1990)

Показатели	Навоз	Бобовые травы
Рыхление подпочвы	0	2
Оструктуривание почвы	2	3
Накопление азота	2	3
Накопление гумуса	2	3
Накопление P, K, Ca, Mg, микроэлементов	1	0
Использование осадков	3	2
Уменьшение эрозии почвы и вымывания	0	3
Борьба с сорняками	0	2
Суммарный балл	10	18
Интегральный эффект		
Урожайность	2	3
Экономия энергоресурсов	0	2
Экологическая безопасность	1	3
Общий балл	3	8

\*0 – нет действия; 1 – слабое действие; 2 – хорошее действие; 3 – сильное действие

Бобовые растения отличаются высокой продуктивностью фитомассы при длительном возделывании на одном месте (табл. 2.3.2). Прежде всего они отличаются высокой средней урожайностью семян (15–30 ц/га): соя, горох, нут, чечевица, чина. Многие сорта сои при орошении формируют высокий урожай зерна (35–40 ц/га), инокуляция семян нитрагином повышает урожай зерна на 2–3 ц/га, орошение – на 3–6 ц/га.

На легких песчаных и супесчаных почвах ряд бобовых многолетних трав (люпин, эспарцет, сераделла) формируют 400–600 ц/га зеленой биомассы. В богарных условиях клевер и люцерна формируют 700–800 ц/га фитомассы, а при орошении – свыше 1000 ц/га. Эспарцет в острозасушливые годы продуцирует высококачественное сено на уровне урожая люцерны, которое не вызывает тимпанита у животных. Бобовые травы в богарных условиях формируют 50–100 ц/га сена, а люцерна при орошении – свыше 300 ц/га. После уборки бобовых растений (донник, клевер, люцерна, лядвенец) на поле остается свыше 50 ц/га пожнивно-корневых остатков.

Существенную роль в выполнении плодородия почвы играют сухие вещества бобовых сидеральных культур (зеленое удобрение) и их ПКО (табл. 2.3.3). Однако большую массу органического вещества бобовые формируют в смешанных посевах: вики, гороха, люпина с овсом, ячменем, подсолнечником; клевера с тимофеевкой, мятликом, ежой сборной; сои, фасо-

ли, нута и чины с кукурузой, суданской травой. В таких смешанных агрофитоценозах активно идет передача азота от бобовых компонентов к другим, обогащая их (Соколов, Семенов, 1983; Трепачев, 1999).

Таблица 2.3.2 – Продуктивность бобовых растений в различных регионах России, ц/га

Культура	Зерно (семена)	Зеленая масса	Сено (семена)	Растительные остатки
Бобы	50–60	97–256	25–80	10–15
Вика	15–50	80–316	18–66	10–34
Горох	14–42	93–247	23–68	14–32
Донник	2–9	108–500	31–96	40–50
Клевер луговой	1–6	157–1114*	41–120	48–64
Козлятник восточный	6–8	700–800	70–165	67–136
Люпин многолетний	5–7	154–300	43–84	21–39
Люпин однолетний	30–60	104–600	40–112	25–43
Люцерна	1–2	397–1000*	45–350*	74–300*
Лядвенец рогатый	1–4	640–750	30–146	54–62
Нут	5–41	77–153	15–61	24–28
Сераделла	5–13	54–426	17–75	10–18
Соя	14–40	138–239	56–80	19–63
Фасоль	10–30	51–147	15–42	7–11
Чечевица	7–35	57–185	15–53	13–17
Чина	15–47	69–214	20–61	10–15
Эспарцет	5–9	130–388	20–133	17–27

\*при орошении

Наибольшую массу органического вещества формируют люпин однолетний, донник белый (до 14–16 т/га), козлятник восточный, люпин многолетний, люцерна посевная (до 8–11 т/га). Наименьшее количество сухого вещества накапливает горох. С биомассой бобовых растений в почву поступает 50–400 кг/га биологического азота. Наибольшее количество (300–400 кг N/га) азота накапливают люцерна, донник, козлятник. Наименьшее количество (50–100 кг N/га) – горох.

Таблица 2.3.3 – Поступление в почву сухого вещества и биологического азота с сидеральными бобовыми культурами

Растения	Поступает в почву	
	сухого вещества, т/га	биологического азота, кг/га
Вика	5–7	100–150
Горох	2–3	50–100
Донник белый	11–14	200–300
Клевер луговой	7–8	160–200
Козлятник восточный	9–11	200–300
Люпин многолетний	8–11	200–250
Люпин однолетний	5–16	150–200
Люцерна посевная	8–11	300–400
Лядвенец рогатый	5–8	160–200
Сераделла	5–7	150–200
Эспарцет	8–10	150–200
Среднее	7–10	160–230

Характер изменения плодородия почвы, вызываемого сидеральными культурами и ПКО, зависит от их качества (состава). Степень влияния – от уровня разложения белков, углеводов, жиров, клетчатки, лигнина, целлюлозы, гемицеллюлозы, полифенолов, содержание которых варьирует от биологических особенностей культуры и комплекса факторов.

Вторым показателем качества сидератов является доступность их тканей почвенным микроорганизмам (Семенов, Ходзнаева, 2006). Показателями оценки качества служат: растворимый углерод, общий азот, лигнин, клетчатка, полифенолы, отношения C:N, лигнин:N, полифенол :N (Frankenberger, Abdelmagid, 1985; Fox et al., 1990; Handayanto et al., 1997; Henriksen, Breland, 1999; Trinsoutrot et al., 2000).

Под действием многолетних трав (клевер, люцерна, козлятник) за 8 лет количество гумуса в черноземе выщелоченном увеличилось на 1,2%, тогда как в пару снизилось до 5,4% (Середа и др., 2010) (табл.2.3.4). Применение гороховой соломы в качестве удобрения обеспечило повышение на 86–91% новообразование гумуса и на 37–48% – биологического азота в черноземе типичном (Колсанов и др., 2002). Использование ячменной соломы в этих условиях снижало на 10,5% урожай гороха и ухудшало качество зерна.

Высокая продуктивность люцерны (58,9 т/га на втором году жизни) и эффективность в воспроизводстве плодородия почв обязывает возделывать ее в полевых севооборотах. Введение сидерального пара и насыщение севооборота пропашными культурами на 28% привели к повышению содержания гумуса через 11 лет на органоминеральном фоне на 0,15% (Дедов, Несмеянова, 2012).

Таблица 2.3.4 – Изменение содержания гумуса в почве под действием многолетних бобовых трав

Почва, регион	Культура	Бобовое растение	Вид содержания, лет	Содержание гумуса, %		
				исходное	под травами	п р и - бавка
Чернозем выщелоченный, Башкортостан	севооборот	клевер, люцерна, козлятник	севооборот, монокультура, 8 лет	7,5	8,7	1,2
Дерново-слабоподзолистая, Смоленская обл.	монокультура	клевер, 11 сортов	монокультура, 4 года	1,8	2,1	0,30
Дерново-подзолистая, Московская обл.	монокультура	люцерна, лядвенец	бобовые травы, 2 года	1,72	1,93	0,21
	монокультура	клевер	бобовые травы, 2 года	1,72	1,88	0,16
Рыхлые песчаные, Смоленская обл.	Монокультура	Люпин	Четырехкратное внесение, 74т/га	1,10	1,72	0,62
Супесчаные дерново-подзолистые, Полесье	Севооборот	Люпин	Пятипольный севооборот 9 лет	2,02	2,53	0,51
Дерново-подзолистая песчаная, Пермский край	Севооборот	Люпин	Сидеральный пар, 2 года	0,88	1,06	0,18
Чернозем типичный Воронежская обл.	Севооборот (органоминеральная система)	Люцерна	Семипольный севооборот, 43% пропашных культур, 21 год	3,12	3,63	0,51
Чернозем типичный, Воронежская обл.	Севооборот (органическая система)	Люцерна	Семипольный севооборот, 28% пропашных культур, 21 год	3,03	3,74	0,71

При введении в севооборот многолетних бобовых трав и уменьшении площади посева пропашных культур содержание гумуса на органоминеральном фоне повышалось на 0,47%, а при внесении органических удобрений – на 0,57%. При сокращении пропашных культур до 28% содержание гумуса в черноземе повышалось на 0,51 и 0,71% соответственно.

Однако использование сидератов не всегда сопровождается повышением содержания гумуса в почве. При узком соотношении C:N (10:1) фитомасса сидерата может выступить в роли «загрывочного» агента и стимулировать минерализацию органического вещества почвы. В результате содержание гумуса снижается. Для предупреждения этого эффекта с зеленой массой сидерата необходимо вносить солому зерновых культур с широким соотношением углерода к азоту (80:1). Солома злаковых культур усиливает иммобилизацию питательных веществ (особенно азота) в почве, снижая тем самым их потери.

Обладая пролонгированным действием, биологический азот стабилизирует его круговорот и повышает экологическую устойчивость агроэкосистем (Мишустин, Черепков, 1979; Трепачев, 1999). Симбиотическая азотфиксация вносит основной вклад в запас почвенного азота в последствии. На длительность и эффективность последствия биологического азота влияют различные экологические факторы (тип и свойства почвы, гидротермический режим, активность микроорганизмов, характер антропогенного воздействия) (Назарюк, 2002). На азотный режим почвы (интенсивность процессов минерализации – иммобилизации) оказывает воздействие генотип предшественника (Назарюк и др., 2007, 2009).

Максимальное количество  $\text{NO}_3^-$  и азота микробной биомассы накапливалось в черноземно-луговой почве при выращивании суперклубенькового мутанта К-301а и рекуррентной линии К-562 а (Назарюк и др., 2016). После уборки макросимбионтов в микробную массу включилось 70–80% азота, в форме нитратов накапливалось 12–14%, в форме аммонийного азота – 4,7%.

Потребление элементов питания яровой пшеницей зависело от генотипа предшественника (табл. 2.3.5)

Таблица 2.3.5 – Урожайность и потребление элементов питания в зависимости от последствия фиксированного азота гороха (Назарюк и др., 2016)

Генотип макросимбионта	Урожай, г/м <sup>2</sup>	Потребление элементов, г/м <sup>2</sup>		
		азот	фосфор	калий
Бесклубеньковый мутант К-20а	310	6,89	2,22	7,06
	483			
Суперклубеньковый мутант К-301а	505	12,59	3,30	9,97
	655			
Рамонский 77	341	8,39	2,53	7,97
	543			
Линия К-562а	534	14,18	3,40	10,41
	678			

Примечание: в числителе – зерно; в знаменателе – солома.

На протяжении трех лет последствия пшеница потребляла наибольшее количество элементов питания после линии гороха К-562а и мутанта

К-301а. Доля азота атмосферы достигала 50% от общего количества потребляемого азота, что свидетельствует о ведущей роли генотипа макросимбионта в повышении эффективности предшественника для пшеницы. В этих же условиях пшеница накапливала наибольшее количество белков в зерне. Наименьшее количество элементов питания пшеница потребляла после мутанта К-20а. Лучшие условия минерального питания после мутантов гороха К-562 а и К-301а обеспечили наибольшую продуктивность яровой пшеницы. Таким образом, последствие азота, фиксированного различными генотипами гороха, длилось в течение трех лет; при этом повышалось содержание сырого белка в зерне пшеницы.

Обладая универсальными свойствами, бобовые растения широко используются в качестве зеленого удобрения.

**Вику** возделывают в лесолуговой и лесостепной зоне, урожаем зеленой массы – 8–10 т/га. Выращивают в чистом виде и в смеси с овсом, наряду с этим используют тройные смеси (вико-овсяно-райграсовые). Вику на зеленое удобрение размещают в занятом пару.

**Горох** на зеленое удобрение возделывают в занятом пару. Наибольшей эффективностью отличаются горохо-овсяные смеси, используют горох и его смеси в пожнивных и поукосных посевах. При применении гороха на зеленое удобрение запашку производят в период максимального накопления надземной массы, в период массового цветения до фазы плодообразования.

**Донник** наибольшую зеленую массу (40–50 т/га) формирует на второй год жизни в период цветения. Из-за высокого содержания элементов питания в зеленой массе (азота – 0,8%, фосфора – 0,05%, калия – 0,2%, кальция – 0,4%) донник представляет большую удобрительную ценность. По своим сидеральным свойствам донник не уступает люпину. С запаханной зеленой массой донника в почву поступает свыше 600 кг питательных элементов, из них – 250–300 кг азота (Лошаков, 2015). За двухлетний цикл развития донника с надземной массой (органического вещества) в почву поступает 550 кг азота, 160 кг фосфора и 400 кг калия на 1 га. Это второй после люпина «биологический завод» по производству азота, фосфора и других элементов питания (Прянишников, 1965). Донник также выполняет важную фитосанитарную функцию: после него в почве снижается численность проволочников и нематод, уменьшается поражение зерновых культур гнилями.

**Клевер луговой** при урожае зеленой массы 20 т/га накапливает 160 кг биологического азота и 40 кг в корневой системе. Зеленая масса клевера богата зольными элементами. В 1 кг массы содержится, % на абс. сух. в-во: азота – 1,89; фосфора – 0,49; калия – 2,13; кальция – 1,57; магния – 0,11. Зеленая масса клевера используется целиком на месте его выращивания, или отавно, когда запахивается отава последнего года жизни, или укосно, когда зеленая масса скашивается и вносится на соседних полях. При запашке зеленой массы клевера на месте его произрастания в почву вносится такое количество органического вещества и элементов питания, какое равноценно применению 30–35 т/га подстилочного навоза (Лошаков, 2015).

**Козлятник восточный (галега восточная)** отличается не только высокой продуктивностью, но и высокими кормовыми достоинствами зеленой массы, которая богата протеином и другими питательными веществами.

В условиях Нечерноземной зоны показано, что по накоплению атмосферного азота в почве козлятник намного превосходит горох, вику, клевер, донник, другие культуры и стоит в одном ряду лишь с люпином многолетним – 300 кг/га. При этом половина азота отчуждается в поля в составе урожая зеленой массы, а другая половина остается в почве в составе 14–17 т/га поукосно-корневых остатков. Это делает козлятник лучшим предшественником зерновых культур.

В качестве зеленого удобрения рекомендуются укосная и отавная форма использования козлятника как сидерата (Лошаков, 2015).

**Люпин многолетний** используют для окультуривания «бросовых земель», то есть на зеленое удобрение. Удобрительная ценность многолетнего люпина определяется формированием биомассы и высокой азотфиксирующей способностью: при урожае зеленой массы 25 т/га люпин накапливает 200–240 кг/га азота, и свыше 60 кг/га его – в корневых остатках. В зеленой массе люпина содержится: N–1,98%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–0,43%, K<sub>2</sub>O–2,26%, Ca–2,41%, Mg– 0,34% на сухое вещество (Новиков и др., 2002). Люпин быстро отрастает после скашивания и за период вегетации формирует два урожая зеленой массы.

**Люпин однолетний** («северная соя») применяют как сидерат вследствие того, что он в условиях Нечерноземья формирует 40–60 т/га зеленой массы. В земледелии используют люпин узколистый и люпин желтый. Оба вида успешно выращивают на песчаных и супесчаных кислых почвах. На этих почвах люпин способен фиксировать 100–300 кг/га экологически безопасного азота. Восприятие труднодоступных соединений фосфора из глубоких слоев почвы позволяет люпину обогащать верхние ее слои этим элементом. Использование люпина на зеленое удобрение является энергосберегающим и экологически безопасным приемом в земледелии, поскольку дает возможность в значительной степени заменить энергоемкие азотные удобрения биологическим азотом.

**Люцерна посевная** формирует до 4–5 укосов с общим урожаем до 100 т/га зеленой массы. Высокая продуктивность и большая удобрительная ценность зеленой массы делают ее важной сидеральной культурой. Зеленую массу люцерны запахивают в почву непосредственно на месте выращивания в последний год использования или укосно для удобрения соседних полей.

**Сераделла** по удобрительной ценности не уступает люпину однолетнему и навозу. В зеленой массе сераделлы содержится: азота –0,49%, фосфора – 0,18%, калия – 0,44%, кальция – 0,32% на сухое вещество. В зависимости от условий используют всю зеленую массу, укосную или только отрастающую отаву. При комплексном использовании сераделлы укосная масса идет на корм животным, а отава – на удобрение. При запашке зеленой массы сераделлы в почву поступает 400–450 кг/га основных элементов питания, что равноценно 35 т/га подстилочного навоза.

**Эспарцет** достигает максимальной продуктивности (50 т/га зеленой массы) на второй год жизни. Накапливает в почве 100–120 кг N/га, улучшает ее структуру, он рано освобождает поле и является хорошим предшественником для озимых и яровых зерновых культур. Растение хорошо выдерживает засуху и превосходит люцерну по урожаю биомассы на 20–25%.

Травы являются одним из основных источников элементов минерального питания, которые входят в состав золы, % на сухое вещество: бобовые травы – 3,2–4,4; злаковые травы – 3,9–6,4.

Повышенным содержанием фосфора отличаются люцерна, лядвенец, эспарцет, клевер; калия – люпин, клевер, люцерна, эспарцет; кальция – люцерна, люпин, эспарцет, клевер; магния – эспарцет, соя, лядвенец; серы – вика, люпин, соя (табл. 2.3.6–2.3.7).

Таблица 2.3.6– Состав фитомассы сидеральных культур

Культура	Зеленая масса, т/га	Элементы, % на сухое вещество				
		N	P	K	Ca	Mg
Амарант	70–100	0,55	0,21	0,69	2,40	0,34
Вика	8–30	2,27	0,62	1,00	1,63	0,37
Горох	3–6	1,40	0,70	0,50	1,82	0,14
Гречиха	10–15	0,80	0,61	2,42	0,95	0,19
Горчица белая	20–30	2,18	0,64	2,94	1,49	0,30
Донник	40–50	0,55	0,16	0,40	0,97	0,37
Клевер красный	30–40	1,89	0,49	2,19	1,57	0,11
Козлятник восточный	15–35	2,10	0,55	1,21	1,47	0,31
Люпин многолетний	5–40	1,98	0,43	2,26	2,41	0,34
Люпин однолетний	50–60	0,56	0,18	0,35	0,97	0,34
Люцерна посевная	80–100	2,60	0,65	1,50	2,52	0,31
Лядвенец рогатый	15–30	2,52	0,49	1,40	1,65	0,47
Озимая рожь	5–10	0,45	0,26	1,00	0,29	0,09
Рапс	40–60	0,70	0,20	1,00	2,00	0,21
Редька масличная	20–40	0,97	0,47	1,90	1,10	0,21
Сераделла	20–25	0,49	0,18	0,44	1,82	0,28
Сурепица	15–25	0,78	0,51	1,77	1,00	0,24
Фацелия	20–30	0,34	0,13	0,45	0,39	0,17
Эспарцет	25–40	2,50	0,46	1,30	1,68	0,63

Для бобовых сидератов характерно более узкое соотношение C:N (30–40:1), что стимулирует рост бактерий, тогда как для злаковых культур свойственно широкое соотношение (50–85:1), которое обеспечивает устойчивое развитие грибов (Lundquist et al., 1999).

Бобовые сидераты положительно влияют на состав микробиоценоза. Так, под действием биомассы люпина растет численность бактерий, которые интенсифицируют процессы разложения биомассы и новообразование гуминовых веществ (Такунов и др., 1995). Уже через 20 суток после внесения биомассы люпина в почву численность неспорных бактерий возросла в 7–10 раз, спорных – в 12–15 раз, а грибов – в 2 раза (Возняковская и др., 1988, 1989). Растет численность тех групп микроорганизмов, которые участвуют в метаболизме органического вещества, в его минерализации (аммонификаторы, актиномицеты, сапрофитная микрофлора) (Довбан, 1990; Яговенко и др., 2003).

Таблица 2.3.7 – Химический состав соломы сельскохозяйственных культур (Новиков и др., 2007; Лукин и др., 2014)

Культура	Сухое вещество, %	Органическое вещество, %	Содержание в воздушно-сухой массе, %							Соотношение C:N (N=1)
			N	P2O5	K2O	CaO	MgO	S	зола	
Озимая пшеница	86	81	0,50	0,20	0,90	0,28	0,11	0,04	4,86	80
Озимая рожь	86	82	0,45	0,26	1,00	0,29	0,09	0,16	3,93	85
Озимая тритикале	86	82	0,40	0,20	0,90	0,30	0,10	0,16	3,90	85
Ячмень	86	81	0,50	0,20	1,00	0,33	0,09	0,15	4,49	80
Овес	86	79	0,65	0,35	1,60	0,38	0,12	0,17	6,45	60
Яровая пшеница	86	82	0,60	0,20	0,75	0,26	0,09	0,05	3,48	65
Кукуруза	86	81	0,75	0,30	1,64	0,49	0,26	0,15	4,37	50
Рапс	85	80	0,70	0,25	1,00	2,00	0,21	0,30	4,77	55
Гречиха	86	80	0,80	0,60	2,40	0,95	0,19	0,13	5,25	50
Горох	86	81	1,40	0,35	0,50	1,82	0,27	0,32	3,91	30
Люпин	86	81	1,00	0,25	1,75	0,97	0,34	0,40	4,06	40
Соя	86	82	1,20	0,30	0,50	1,46	0,50	0,33	3,23	30
Вика	86	81	1,40	0,27	0,65	0,56	0,37	0,50	4,43	30

В условиях дерново-подзолистой почвы микроорганизмы более энергично использовали азот фитомассы многолетних трав (меченных  $^{15}\text{N}$ ) по сравнению с сульфатом аммония (Шмырева и др., 2014). Максимальное количество азота клевера включалось в биомассу микроорганизмов на 12–25-е сутки, а затем несколько снижалось. Максимальное количество азота тимopheевки включалось в микробную биомассу на 25-е сутки, а затем также несколько снижалось. При совместном внесении фитомассы клевера с тимopheевкой включение азота в микробную биомассу возрастало по сравнению с фитомассой тимopheевки и снижалось по сравнению с фитомассой клевера. Максимальное количество связанного микроорганизмами азота фитомассы многолетних трав достигало на 25-е сутки и составляло 36–44% от внесенного азота.

При внесении биомассы сидератов наибольшее количество минерального азота образует клевер, несколько меньше – вико-овес и горох. Разложение растительного материала – это сложный, многоступенчатый биохимический процесс, в результате которого происходят не только распад и минерализация сложных органических веществ, но и синтез новых соединений (Аристовская, 1980). Разложение характеризуется двухфазной динамикой интенсивного вначале и медленного после выделения  $\text{CO}_2$ . Основное количество органического углерода минерализуется до  $\text{CO}_2$  в течение 1–3 месяцев. В почве вокруг растительной частицы образуется три зоны активности микроорганизмов. Первые две зоны почвы по аналогии с ризосферой называются детритосферой (Семенов, Ходжаева, 2006). В разложении растительных частиц участвуют четыре группы микроорганизмов: целлюлозолитики, гемицеллюлозолитики, пектинолитики, лигнинолитики. Ряд микроорганизмов обладают набором деполимераз, с помощью которых они способны разлагать полисахариды, полифенолы. Азотсодержащие органические вещества разлагаются микроорганизмами посредством гидролаз, оксидаз, деаминаз и лиаз. Скорость разложения фитомассы контролируется содер-

жанием в ней азота и соотношением C:N. Так, корни бобовых трав с узким соотношением углерода к азоту быстрее минерализуются до  $\text{CO}_2$ , чем корни злаковых трав (Urquiaga et al., 1998).

Минерализация растительного материала ограничивается содержанием азота, поэтому остатки бобовых с высоким количеством элемента разлагаются быстрее чем с низким (Frankerberger, Abdelmagid, 1985; Henriksen, Breland, 1999; Korsaelth et al., 2002). При высоком содержании азота в растительных тканях разложение лигнина замедляется.

Длительное применение бобовых сидератов способствует росту количества органического вещества в почве. При запашке зеленой массы клевера на месте его произрастания в почву поступает такое же количество органического вещества и элементов питания, которое вносится с 30–35 т/га подстилочного навоза (Новиков и др., 2008). Ежегодное внесение в серую лесную почву (Новосибирская обл.) 6,6 и 7,9 т/га зеленой массы клевера совместно с минеральными удобрениями в течение 12 лет сопровождалось повышением содержания гумуса и общего азота на 0,37–0,43% и 0,07–0,08% соответственно (Гамзиков и др., 2014).

Особенностью сидеральных культур является то, что по своему составу они достаточно близки удобряемых ими растений и поэтому после разложения обеспечивают их в полной мере питательными веществами, а почву – гумусом. Таким образом, сидераты являются экологически безопасным удобрением сельскохозяйственных культур при условии неприменения неоправданно высоких доз пестицидов и минеральных удобрений.

Применение гороховой соломы, биомассы желтого люпина повышало в почве содержание органического углерода на 0,08–0,1% (Чимитдоржиева, Нимаева, 1991; Такунов и др., 1995; Колсанов и др., 2002; Надежкин, Щербаков, 2000). Добавление к зеленому удобрению соломы злаковых культур усиливало эффект образования гумуса. Внесение фитомассы с узким соотношением C:N (бобовые культуры) способствует более быстрому обогащению почвы гумусом (Шмырева и др., 2012).

При ежегодном падении количества гумуса в почве пашни 0,4–0,7% от его запасов снижается не только общее количество, но меняется и его качественный состав. Так, если в черноземе выщелоченном содержание гумуса в пахотном слое снизилось на 0,22% по сравнению с целиной, то количество водорастворимого гумуса – в пять раз (Дедов, 1999; Дедов и др., 2004). Водорастворимое органическое вещество (ВОВ) определяет не только потенциальное, но и эффективное плодородие почвы, поскольку уровень его содержания тесно связан с содержанием гуминовых кислот и общего количества гумуса, оно служит источников биогенных элементов, ферментов и  $\text{CO}_2$ . Введение сидеральных паров в севооборот (донник или эспарцет) повышало содержание ВОВ до уровня в варианте с навозом и выше на 62% по сравнению с контролем.

От сидерации меняется и групповой состав гумуса: растет суммарное содержание Сг.к. на 20–30% (за счет фракций, связанных с кальцием и полуторными оксидами) по сравнению с исходным уровнем, а количество фульвокислот снижается (Довбан, 1990; Надежкин и др., 1998). При этом растет на 0,09–0,12% содержание лабильного органического вещества (за счет молодых форм гумуса) и увеличивается соотношение Сг.к. : Сф.к.

Биомасса люпина изменяет качественный состав гумуса: увеличивается количество гуминовых кислот и негидролизуемого остатка, снижается содержание фульвокислот (Довбан, 1990, 1992). Биомасса клевера, в отличие от биомассы люпина, в большей степени способствовала синтезу гуминовых кислот, тогда как биомасса костреча – синтезу фульвокислот (Шмырева и др., 2012).

При разложении зеленой массы молодых растений (богатых азотом и растворимыми соединениями, бедных лигнином) в гумусе почвы закрепляется незначительное количество азота, снижается содержание гуминовых кислот (Высоцкая, 1974). При повторном внесении биомассы люпина усиливается накопление азота в гуминовых кислотах (фракции, связанные с кальцием и полуторными окислами), снижается синтез свободных гуминовых кислот (Высоцкая, 1974).

За 14 лет произошло снижение на 30–37% содержания водорастворимого органического вещества в серой лесной почве (Яговенко, 2007). За это же время содержание лабильного органического вещества (ЛОВ) изменялось мало. При включении в состав севооборота люпинового пара возросла на 12–13% относительно исходной почвы сумма фракций гуминовых кислот, при этом увеличилось количество ГК-1. Несмотря на стабильное содержание гумуса в почве, в течение 14 лет процесс трансформации шел в направлении мобилизации гуминов, при минерализации которых они переходили в группу более подвижных гумусовых кислот (Дедов и др., 2001; Дегунова, Челяк, 2003, Яговенко, 2007).

Поступление с биомассой бобовых сидеральных культур (клевер, люпин, эспарцет, козлятник, донник) большого количества легкогидролизуемого органического вещества, обогащенного биологическим азотом, позволяет оптимизировать содержание гумуса, улучшает физико-химические свойства почвы, ее биогенность (Яговенко и др., 2003; Иванов и др., 2008; Харкевич и др., 2011).

При внесении биомассы бобовых сидератов в почву активизируются процессы ее трансформации, от направленности и активности которых зависит эффективное плодородие, ее азотный, фосфорный и калийный режимы. Ряд культур (люцерна, люпин, донник, сераделла), обладая мощной корневой системой, потребляет значительное количество элементов из трудноусвояемых соединений почвы (110–250 кг/га кальция, 14–22 кг/га магния и 23–25 кг/га фосфора). Это обстоятельство особенно важно для кальция, обладающего высокой миграционной способностью. Сидераты предотвращают вымывание кальция из корнеобитаемого слоя, а при внесении их биомассы возвращают его в почву, включая в новый круговорот веществ. Благодаря минерализации органического вещества сидерата в почве создаются условия постепенного освобождения элементов питания и их усвоения возделываемой культурой; тем самым повышается эффективность участия в продукционном процессе, существенно снижаются их потери.

В симбиозе с клубеньковыми бактериями люпин вовлекает в биологический круговорот 150–400 кг/га атмосферного азота. Биологический азот, в отличие от минерального и органического, полностью усваивается растениями. Азот зеленого удобрения в большей степени используется последу-

ющими культурами в сравнении с азотом минеральных и органических удобрений (Кант, 1982). Положительное действие биологического азота длится до 4 лет.

После люпинового пара на легких почвах накапливается наибольшее количество нитратов (на 34,5 кг/га) перед посевом озимых (Яговенко и др., 2003). При запашке биомассы желтого люпина осенью в серой лесной почве накапливалось 116 кг/га минерального азота, тогда как при запашке узколиственного люпина – 91,6 кг/га (Такунов и др., 1995; Такунов и др., 2000).

В конце ротации севооборота с люпином повышалось содержание обменного калия с 14 до 18 мг/100 г почвы (Яговенко, 2001). В условиях среднесмытой дерново-подзолистой почвы под действием люпина содержание подвижного фосфора увеличилось с 7,9 до 10,6 мг, обменного калия – с 10,6 до 16,2 мг/100 г почвы. Корневая система желтого люпина способна возвращать в пахотный слой до 20 кг/га труднодоступного фосфора.

В условиях чернозема обыкновенного (гумус – 6,2%,  $pH_{\text{сол}} - 6,8$ ) при внесении сухой массы гороха (4,15–5,21 т/га) в почву поступало кг/га: 102–144 азота, 12–16 фосфора и 62–85 калия (Котлярова и др., 1998). Наиболее благоприятное содержание и соотношение C:N в наземной массе гороха 12–14:1. Чем оно шире, тем хуже уровень азотного питания в первый год запашки биомассы, тем ниже урожай озимой пшеницы. При этом в почве черного пара накапливалось большее количество  $N-NO_3$  (18,8 мг/кг), чем при запашке биомассы гороха, что свидетельствует об интенсивной минерализации органического вещества почвы. Однако при запашке биомассы гороха в почве накапливалось большее количество подвижного фосфора и калия, чем в почве чистого пара. Звенья севооборота по гороховому сидеральному пару по продуктивности не уступали звену с черным унавоженным паром. Мелкая заделка (14–16 см) биомассы донника является более эффективной по сравнению с глубокой запашкой (25–27 см) вследствие того, что при мелкой заделке содержание  $N-NO_3$  в черноземе выщелоченном возрастало в 2,1–7,4 раза (Берзин, Шпедт, 2001).

Главную роль в повышении эффективности действия азотных удобрений принадлежит предшественнику (Кушниренко, 1972). Влияние его на пищевой режим почвы обусловлено биологией развития, количеством и качеством пожнивных остатков, развитием корневых систем, характером микробного сообщества, сроком уборки.

На черноземах обыкновенном и выщелоченном эффективность применения возрастающих доз азотных удобрений полностью зависела от предшественника (рис.2.3.1). Наиболее эффективно азотные удобрения действовали по зерновому предшественнику, слабее – по кукурузе на силос, а после гороха и вико-овсяной смеси – неэффективно (Кушниренко, 1972). При внесении возрастающих доз азотного удобрения после яровой пшеницы росло потребление азота и урожай зерна пшеницы, тогда как после гороха азотные удобрения усиливали потребление азота растениями, а урожай зерна пшеницы снижался. По фону зернового предшественника проявлялась линейная зависимость между дозами азота и урожаем зерна пшеницы. По пропашному предшественнику азотные удобрения эффективно действовали до дозы 60 кг N/га, выше которой урожай снижался. На фоне гороха и вико-овсяной

смеси между этими признаками установлена отрицательная связь. На фоне без применения азотных удобрений яровая пшеница по гороху формировала урожай зерна 30 ц/га, тогда как по яровой пшенице для достижений этой продуктивности необходимо вносить удобрения в дозе 70–80 кг N/га.

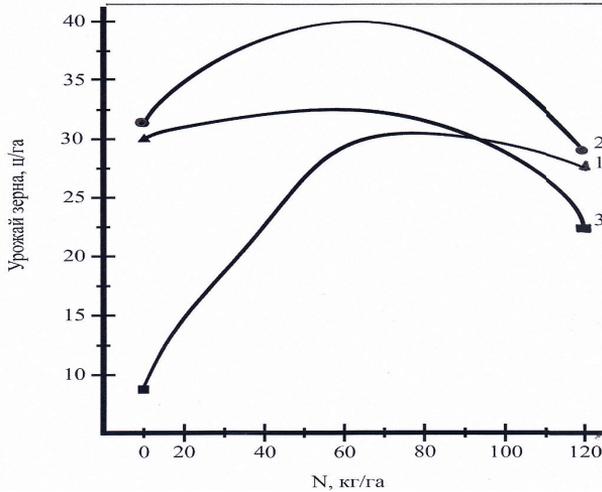


Рисунок 2.3.1. Зависимость урожая зерна яровой пшеницы от доз азотных удобрений и предшественника (по Кушниренко, 1972). Предшественники: 1 – яровая пшеница; 2 – кукуруза, зеленая масса; 3 – горох

Многолетние травы обогащают почву органическим веществом, улучшают и положительно влияют на ее структуру и гумусовый баланс, защищают от водной эрозии, очищают поля от сорняков, подавляют развитие патогенных микроорганизмов и уменьшают заболеваемость растений. По влиянию на плодородие почвы, урожайность и качество зерновых и других культур многолетние травы часто превосходят чистые и занятые пары. Однако это закономерно лишь при наличии влаги, так как для своей вегетации они требуют значительно больше воды, чем другие культуры, поэтому распространены в достаточно увлажненных районах и на орошаемых землях. Многолетние травы положительно влияют не только на первую, но и на вторую и третью культуры севооборота.

В Предбайкалье на светло-серых лесных почвах для яровой пшеницы, посеянной по пласту бобовых трав, обеспечиваются лучшие условия по содержанию в почве азота. Урожай и качество зерна всегда были выше, чем при посеве по чистому пару и злаковым травостоям (табл. 2.3.8). При возделывании в севооборотах озимой пшеницы пласт многолетних трав целесообразнее оставлять для яровой, а оборот пласта – для озимой пшеницы. При этом выигрывается еще один укос многолетних трав и повышается на 0,5–0,6 т/га суммарный урожай зерна. Яровая пшеница весьма чувствительна к сорнякам, вредителям и болезням, поэтому повторные ее посевы допускаются только по обороту двухлетнего пласта многолетних трав (Замашников, 2009).

Таблица 2.3.8– Влияние предшественников на урожай и качество зерна яровой пшеницы (Замашиков, 2009)

Предшественник	Урожайность зерна, т/га	Сырой белок, %	Сырая клейковина, %
Пар чистый	2,1	15,0	28,6
Козлятник	3,0	15,8	34,0
Эспарцет	2,6	15,2	29,2
Люцерна	2,7	15,4	28,9
Клевер	2,2	15,2	31,5
Кострец	2,2	14,7	27,3

Большую ценность как предшественники представляют зернобобовые культуры (горох, чечевица, вика, люпин и др.), прежде всего благодаря их азотфиксирующей способности. Они накапливают в почве меньше азота, чем многолетние клевер и люцерна, но достаточно для того, чтобы горох и другие бобовые были хорошими предшественниками для многих сельскохозяйственных культур на малоплодородных дерново-подзолистых и иных почвах. В исследованиях на черноземе обыкновенном карбонатном в засушливых условиях Ростовской области выращивание озимой пшеницы после гороха позволило получить урожайность зерна 4,45–4,95 т/га (по другим предшественникам – 2,83–3,96 т/га) с содержанием сырого белка 13,2–14,1% (10,6–15,2%) и сырой клейковины 24,5–26,6% (против 21,8–25,9%).

В основе структуры почвы лежит почвенный агрегат, имеющий пространственную организацию, а главную роль «клеящих веществ» играют гумусовые вещества и структурообразующие катионы (Ca, Mg, Al, Fe). В формировании агрегатов почвы посредственное участие принимают грибы, актиномицеты (разлагающие сложные органические полимеры), корневые системы различных растений, растительный опад и выделения, а также растительные остатки (Звягинцев, Зенова, 2001; Милановский и др., 2002; Шеин, Милановский, 2003; Tisdall, Oades, 1982; Andgers, 1992).

Наиболее эффективно на физические свойства светло-каштановой почвы люцерна действовала на третий год жизни: происходили благоприятное разрастание и пронизывание почвы корнями во всех направлениях, обеспечивая дополнительное количество органического вещества и усиливая процессы скрепления и образования водопрочных агрегатов (Дронова и др., 2011). В результате образовалось 58–62% почвенных агрегатов 0,25–10 мм и максимальный коэффициент структурности (1,40–1,66) (при 1,25–1,27 на контроле).

В зернопропашном севообороте многолетние травы (люцерна и клевер, 50:50) повышали на 21,1% содержание водопрочных агрегатов чернозема выщелоченного, под посевами козлятника – на 35,8% (табл. 2.3.9). Коэффициент структурности за три года увеличился в 1,4 раза, за восемь лет – в 3,2 раза. В почве под козлятником за восемь лет структурно-агрегатный состав приблизился к почве ненарушенного сложения.

Слабое развитие корневой системы многолетних трав в первый год пользования создало условия уплотнения почвы, повысилась ее твердость и снизилась водопроницаемость (Середа и др., 2010). По мере развития трав растительные остатки, рост корней и корневые выделения оптимизировали

структуру и плотность почвы. Тем не менее в отдельные годы многолетние травы приводили к ее иссушению. Поэтому по пласту многолетних трав в условиях неустойчивого увлажнения в Предуралье не рекомендуется высевать озимые культуры (Середа, 2002; Середа и др., 2010).

Таблица 2.3.9 – Содержание гумуса и агрофизические свойства чернозема выщелоченного (Середа и др., 2010)

Агрофитоценоз	Гумус, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>		Твердость, г/см <sup>2</sup>	Водопроницаемость, мм/мин
		0–20 см	20–40 см		
Пар бессеменный	5,4	1,18	1,24	36,4	7,7
Многолет. травы 1-го г.п.	7,5	1,23	1,25	43,7	4,2
Многолет. травы 3-го г.п.	8,4	1,18	1,24	42,9	4,6
Многолет. травы 8-го г.п.	8,7	1,21	1,18	48,7	6,3

При выращивании клевера лугового (10 сортов) на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве рН практически не изменился, сумма обменных оснований повысилась на 0,46 мг-экв/100г, содержание подвижного фосфора возросло на 19 мг/кг, а калия – снизилось на 9 мг/кг.

В течение первого года разлагается основное количество фитомассы остатков (60–90% от общей массы); при этом остатки люцерны разлагались лучше, чем остатки озимой пшеницы и ячменя (Дедов и др., 2001, 2004). Однако на 2-й год разлагалось 17–22% остатков злаковых культур, а люцерны – 10% от внесенной массы. За третий год масса ПКО снизилась на 1–2%.

Ценность растительных остатков определяется не только массой, но и их химическим составом. В условиях чернозема типичного ПКО люцерны разлагаются на 59–66%, донника – на 59–60%, озимой пшеницы – на 25% (Дедов и др., 2016). Растительные остатки смешанных посевов разлагаются значительно сильнее: озимой пшеницы с донником – на 94%, с люцерной – на 92%; подсолнечника с донником – на 92%, с люцерной – на 95%.

Темпы разложения растительных остатков культур севооборота на черноземе типичном за счет поступления фитомассы многолетних бобовых трав, обогащенных азотом таковы: в зернопропашном севообороте разложилось 37% биомассы остатков, в сидеральных севооборотах с донником – 42%, с эспарцетом – 45%, а в зернотравянопропашном озимой пшеницы с люцерной синей – 52% (Хрюкин и др., 2017).

В первый год наиболее интенсивно разлагаются растительные остатки эспарцета, в три раза медленнее – остатки озимой пшеницы (табл. 2.3.10). За три года лучше разлагались остатки эспарцета (96,2% от исходной биомассы), тогда как остатки озимой пшеницы разлагались менее чем на 90%.

Таблица 2.3.10 – Темпы разложения растительных остатков сельскохозяйственных культур, % от исходного (Дедов, Несмеянова, 2012)

Культура	Разложилось по прошествии		
	1 года	2 лет	3 лет
Донник	62,3	75,2	91,1
Эспарцет	79,5	84,6	96,2
Озимая пшеница	25,0	71,9	86,5

Темпы разложения соломы зерновых злаковых культур имеют важные значение, хотя из-за большого количества клетчатки и лигнина (широкое отношение углерода к азоту) она разлагается медленно (табл. 2.3.11).

Таблица 2.3.11– Убыль массы соломы в зависимости от внесения различных видов удобрений и сроков разложения, % (Дедов и др., 2012)

Вариант	Период разложения, сут			
	20	40	60	300
Солома озимой пшеницы (С) – контроль	1,3	17,5	27,4	50,3
С + минеральные удобрения (N10)	6,3	23,1	31,8	70,5
С + донник	12,7	26,5	45,3	78,5
С + эспарцет	12,9	26,7	52,8	77,4
С + горчица сарептская	7,6	25,7	40,2	71,3

Добавление к соломе минеральных азотных удобрений (10 кг N/т) несколько ускоряет ее разложение. Однако добавление зеленой массы донника или эспарцета повышает скорость этого процесса в 1,4–1,5 раза.

Растительные остатки являются важным источником макро- и микроэлементов. В почву с растительными остатками с однолетними бобовыми культурами поступает: азота – 44–54, фосфора – 11–14, калия – 56–76 кг/га; после эспарцета: азота – 77–94, фосфора – 26–34, калия – 99–127 кг/га (Левин и др., 1985). При запашке бобово-капустной смеси значительно улучшался питательный режим почвы, при этом увеличивалось содержание кальция и микроэлементов (Беляк, 2002). Растительные остатки усиливают подвижность фосфатов в почве за счет освобождения неорганического фосфора из разлагаемой массы, блокирования органическими кислотами мест сорбции фосфатов, повышения рН почвенного раствора, формирования отрицательного заряда в местах сорбции (Haunes, Mokolobate, 2001).

Растительные остатки оказывают влияние на соотношение процессов минерализации и иммобилизации азота в почве. Так, иммобилизация азота в почве усиливалась при внесении остатков соевых бобов по сравнению с кукурузой, хотя оба остатка имели одинаковое соотношение С:N (Blackmer, Green, 1995). Иммобилизация азота корней бобовых трав проходила быстрее (по сравнению с корнями злаковых трав), вследствие их быстрого разложения (Urquiago et al., 1998).

При разложении фитомассы гороха более чем 20% ее азота включалось в микробную биомассу уже в первые сутки. На вторые сутки почти 40% азота биомассы гороха использовалось микроорганизмами. Максимальная иммобилизация (12 мг/г внесенного углерода) достигалась при внесении соломы гороха (Jans-Hammermeister, Mc Cliff, 1997; Jensen, 1997).

В модельном эксперименте 15–20% азота соломы бобовых ассимилировали микроорганизмы (Jensen et al., 1997). Суммарное количество иммобилизованного азота почвы и ассимилированного микроорганизмами азота растительных остатков превышало содержание азота микробной биомассы, что свидетельствует об ускорении оборачиваемости микробной биомассы. Значительное количество азота (51,3 мг/г внесенного углерода) минерализовалось в почве при внесении массы белого клевера (Henriksen, Breland, 1999).

Бобовые растения являются важным и экологически безопасным источником пополнения запаса азота в почве, поскольку при их применении закрепляется 50–70% азота биомассы, меченной  $^{15}\text{N}$  (табл. 2.3.12). При этом существенно (более чем в 3 раза) сокращаются газообразные потери по сравнению с азотными минеральными удобрениями. На легких почвах растения меньше используют азот биомассы бобовых (в 1,5 раза) по сравнению с тяжелыми почвами. На легких почвах меньше иммобилизуется азота биомассы и больше его теряется по сравнению с более тяжелыми почвами.

Таблица 2.3.12 – Баланс азота меченных  $^{15}\text{N}$  сидеральных бобовых культур

Почва	Культура	Вид и дозы удобрения	Баланс азота, % от внесенного			Источник
			использовано растениями	иммобилизация в почве	потери	
Дерново-подзолистая супесчаная	Озимая пшеница	биомасса люпина $^{15}\text{N}_{60-70}$	12	52	36	Алейникова, 1974
Дерново-подзолистая суглинистая			19	68	13	
Дерново-подзолистая среднесуглинистая	Ячмень	биомасса клевера $^{15}\text{N}$ 100 мг/кг	12	67	21	Сергеев, 2000
		сульфат аммония $^{15}\text{N}$ 100 мг/кг	36	21	43	
Дерново-подзолистая суглинистая	Овес	биомасса клевера $^{15}\text{N}_{60}$	37	55	8	Сычев и др., 2017
		биомасса люпина $^{15}\text{N}_{60}$	28	60	12	
		биомасса тимopheевки $^{15}\text{N}_{60}$	17	69	14	
Чернозем суглинистый, Канада	Озимая пшеница	з/м чечевицы, $\text{N}_{85}$	19	54	27	Janzen et al., 1990
		Чина, $\text{N}_{76}$	18	42	40	
		$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , $\text{N}_{50}$	24	36	40	
Каштановые почвы, Австралия	Ячмень	люцерна, $\text{N}_{39}$	19	66	15	Ladd, Amato, 1986
Чернозем суглинистый, США		клевер, $\text{N}_{165}$	17	57	25	Harris et al., 1994
		$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , $\text{N}_{124}$	51	19	30	
Серые лесные, Швеция	Ячмень	клевер, $\text{N}_{160}$	15	59	26	Bergstrom, Kirchmann, 2004
		бобы, $\text{N}_{160}$	18	58	24	
		$\text{NH}_4\text{NO}_3$ , $\text{N}_{160}$	36	31	33	
Индонезия	Кукуруза	Gricidia*, $\text{N}_{178}$	15	58	27	Rowe et al., 2004
		$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , $\text{N}_{60}$	33	33	34	
Лугово-глебовая, Филиппины	Рис	Sesbania*, $\text{N}_{60}$	31	59	10	Becker et al., 1994

\*Gricidia, Sesbania – многолетние кустарники семейства бобовых

Озимая пшеница на легких почвах при запарке зеленой массы люпина использовала 22% ее азота, а при запарке ПКО – 36% от применяемой дозы (Люшаков, 2015). Потери азота биомассы бобовых растений колебались в

пределах 8–36% от внесенного, что примерно в два раза меньше потерь азота минеральных удобрений. Потери азота клевера возрастают до 14–15% при совместном внесении его биомассы и сульфата аммония (Серегин, 2000).

В зависимости от почвенно-климатических условий и вида используемого материала баланс азота в агроэкосистеме складывается следующим образом: при внесении бобового источника выращиваемые культуры используют 18–31% внесенного азота, иммобилизуется 42–69%, теряется в виде газообразных соединений – 10–40%; тогда как при применении минеральных азотных удобрений – 24–51, 19–36, 30–40% соответственно (Ladd, Amato, 1986; Janzer et al., 1990; Becker et al., 1994; Harris et al., 1994; Bergstrom, Kirchmann, 2004; Rowe et al., 2004).

В отличие от минеральных азотных удобрений бобовые растения, кроме азота, поставляют значительное количество органического углерода, который служит основой активной деятельности микробного сообщества, усиливая сначала процессы минерализации, а затем и иммобилизации азота в микробной биомассе (Green, Baldock, 1995; Rowe et al., 2004; Crews et al., 2005; Rascher et al., 2012).

При поступлении в почву органического вещества стимулируется жизнедеятельность зимогенной и автохтонной микрофлоры. При широком соотношении C:N (навоз, сидераты) оно формирует более активное и биообразное сообщество микроорганизмов (Щапова, 2004; Caillard et al., 2003; Jnselsbacher et al., 2013). При разложении растительного материала главная роль принадлежит концентрации азота (Palm et al., 2001; Jensen et al., 2005; Crews et al., 2005). При запашке остатков (меченных  $^{15}\text{N}$ ) люпина на втором году жизни в 10-сантиметровом слое почвы минерализовалось 120 кг N/га (нетто-минерализация – 59 кг N/га), из которых 41 кг N/га включалось в микробную биомассу (Murphy et al., 1998; Peoples, Baldock, 2001; Kleinenbecker et al., 2014).

Корни бобовых трав с более узким соотношением углерода к азоту первоначально минерализовались быстрее, чем корни злаковых трав (Thuries et al., 2001; Nadas et al., 2004). Остатки с более узким соотношением C:N разлагались быстрее. По мере сужения соотношения углерода к азоту усиливается иммобилизация азота в почве.

Внесение растительных остатков с узким соотношением C:N способствует более быстрому обогащению почвы гумусом (Nicolardot et al., 2001). Увеличение содержания органического углерода в почве при внесении навоза достигает 6,4–9,8%, с соломой – 3,7–5,2%, тогда как при внесении биомассы сидератов содержание органики может даже снижаться (Щапова, 2004; Jnselsbacher et al., 2013). Чем выше размеры закрепления азота фитомассы в почве, тем ниже газообразные потери ее азота.

Потребление азота люпина яровой пшеницей снижалось при внесении его биомассы с широким соотношением C:N = 25 (Суков, 1977). При этом существенно уменьшались газообразные потери азота по сравнению с соотношением C:N = 23. В этих условиях значительно возросла иммобилизация азота люпина в почве (74 против 56% от применяемой дозы).

В процессе выращивания сельскохозяйственных культур из почвы выделяются парниковые газы ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и др.), количество которых зависит

от вида и состава агрофитоценоза. Так, эмиссия в агрофитоценозе бобовых трав достигает 356–658 мкг N-N<sub>2</sub>O/м<sup>2</sup>·сут (Семенов и др., 2004). В зависимости от вида растительных остатков и способа их заделки из почвы выделяется 20–90 г N-N<sub>2</sub>O/га в сутки. По величине продукции N<sub>2</sub>O сельскохозяйственные культуры расположились в следующей последовательности: ячмень < горох < сахарная свекла.

Растительные остатки стимулируют и минерализацию, и иммобилизацию азота почвы одновременно. Иммобилизация происходит медленнее при внесении зеленой массы по сравнению со зрелой, то есть зеленая масса является эффективным приемом повышения содержания доступного азота в почве (Кузнецова, и др., 2006).

Использование растениями азота растительных остатков (меченных <sup>15</sup>N) и газообразные потери увеличивались с ростом дозы и снижением соотношения C:N (табл. 2.3.13).

Таблица 2.3.13– Баланс азота растительных остатков, меченных <sup>15</sup>N, при выращивании яровой пшеницы (Суков, 1979)

Растительные остатки и удобрения	C:N	Азот, % от внесенного		
		Использовано растениями	Иммобилизация	Потери
Вика	12:1	34	48	18
Люпин	23:1	26	56	18
Люпин	25:1	15	74	11
Клевер	18:1	21	65	14
Сульфат аммония	-	48	32	20

Иммобилизация азота растительных остатков усиливалась по мере повышения соотношения C:N в их органическом веществе. В этих условиях наименьшее количество меченого азота закреплялось в почве при внесении сульфата аммония. Потери азота из остатков отсутствуют при внесении их в пахотную почву совместно с пшеничной соломой, характеризующейся широким соотношением углерода и азота (C:N=118:1). Газообразные потери азота растительных остатков могут достигать 36% от внесенного количества (Dejoux et al., 2005). Большое значение в повышении плодородия почвы принадлежит бобовым растениям, важно их участие в севооборотах. Так, в условиях чернозема типичного (Белгородская обл.) в зернопропашном севообороте с 40% многолетних бобовых трав (эспарцет) содержание гумуса за 15 лет повысилось на 0,38–0,77% по отношению к исходному количеству. Использование многолетних трав и минеральных удобрений в плодосеменном севообороте повысило содержание гумуса в почве на 0,1–0,2% по сравнению с отдельно применяемыми минеральными удобрениями (Тютюнов и др., 2014). Положительную роль в повышении содержания гумуса сыграл эспарцет: при урожае сена 60–90 ц/га в 50–сантиметровом слое почвы остается 40–60 ц/га легкоразлагающихся растительных остатков, способствующих процессу гумификации. Кроме того, за период вегетации ежегодно эспарцет накапливал 114–150 кг/га биологического азота. При совместном использовании многолетних бобовых трав (40% насыщения в зернопропашном севообороте) в течение 20 лет количество гумуса

в почве возросло на 0,63–0,78% (Никитин и др., 2015; Шрамко, Вихорева, 2015, 2016). При насыщении севооборотов многолетними травами до 50% их посевной площади в дерново-подзолистых почвах Нечерноземья создается бездефицитный баланс гумуса (Лошаков, 2015).

Многолетние травы, оставляя в почве большое количество органических остатков, играют важную роль в воспроизводстве плодородия почвы. Так, в ней после уборки урожая трав присутствует до 8 т/га органических остатков, что в 1,5–2 раза больше по соотношению с другими полевыми культурами. Глубокоразвитая корневая система бобовых культур извлекает и вовлекает в биологический круговорот значительное количество питательных веществ. К тому же корневая система многолетних трав повышает количество водопрочных агрегатов в почве и улучшает ее водно-физические свойства (Воробьев, 1979; Левин и др., 1985).

По влиянию на плодородие почвы растительные остатки многолетних бобовых и бобово-злаковых трав приравнены к действию 25–30 т/га подстильного навоза, а плодородие почвы сохраняется в течение 2–3 последующих лет.

При возделывании бобовых растений необходимо учитывать еще одно свойство: они обладают повышенным водопотреблением, поскольку коэффициент транспирации у них в два раза выше, чем у других полевых культур. Поэтому они хорошо растут и развиваются, формируют высокие урожаи зерна и зеленой массы и в районах достаточного увлажнения, и на орошаемых землях.

В условиях недостатка влаги многолетние травы иссушают почву и снижают продуктивность последующих культур. Учитывая, что большая часть земледельческих районов находится в зоне неустойчивого увлажнения, к выращиванию многолетних трав надо относиться рационально, необходимо учитывать возможности их эффективного использования.

При выращивании бобовых растений в качестве покровной культуры создается дефицит минерального азота в почве. Это связано с усилением иммобилизации азота в почве, низкой его мобилизацией из-за низких весенних температур. При этом в засушливый период азотные удобрения попадают в сухую почву; во влажный период они вымываются или смываются осадками.

По-видимому, найден экологически безопасный путь решения проблемы, если роль покровной культуры играют бобовые растения (Баринов, Новиков, 2015). При использовании покровных бобовых культур (люпин узколистный, бобы кормовые и их смеси с тритикале) возрастает количество подвижных форм азота и других элементов питания за счет минерализации ПКО, которые оптимизируют рост многолетних трав (клевер, тимофеевка) и повышают их продуктивность. Под действием покровных культур в почве увеличивается на 40% содержание элементов питания, а суммарная урожайность многолетних трав за три года – на 28%. Это снижает применение подкормок минеральными азотными удобрениями (Колсанов и др., 2002).

Бобовые растения обеспечивают экологическую безопасность вследствие того, что:

- не требуют применения азотных удобрений;

- вырабатывают дешевый полноценный белок;
- после бобового предшественника доза азотных удобрений уменьшается в 1,5–2 раза без снижения эффекта;
- возможно получение экологически безопасной продукции самих бобовых и последующей культуры.

**Выводы.** В основе понимания взаимоотношений растений и микроорганизмов на молекулярном уровне лежат поиск и разработка путей направленного регулирования растительно-микробных взаимодействий, создание эффективных и экологически безопасных сообществ. Молекулярный механизм азотфиксации является сложным лектин-углеводным процессом.

Лектины бобовых растений обеспечивают специфические реакции партнеров при формировании клубеньковых симбиотических систем, обеспечивают специфическую связь с клетками-мишенями или играют роль биологически активного вещества.

В состав агглютинаина входит большое количество кислых аминокислот, отсутствуют серосодержащие аминокислоты и цистин. Углеводный комплекс включает в себя глюкозу, галактозу, маннозу и глюкозамин, он является гликопротеином с большим молекулярным весом. Активность лектинов растет при неблагоприятных условиях. При высокой концентрации азота в среде у азоспирилл полностью исчезает гемагглютинирующая способность, которая вызвана подавлением углеводсвязывающих свойств.

Агглютинины способны выполнять функцию адгезинов и играют важную роль в прикреплении клеток ризобий к корням бобового растения. Взаимодействие растения с бактериями является многоступенчатым процессом с образованием лектин-углеводных и лектин-лектиновых связей. Лектины азоспирилл способны образовывать агрегаты за счет связывания только с экзополисахаридами.

Лектины различных штаммов азотфиксирующих бацилл и агглютинины ризобий обладают ферментативной активностью. Взаимодействие агглютининов ризобий с углеводной частью фракции экзокомпонентов сопровождается увеличением  $\beta$ -глюкозидазной и снижением протеолитической активности. Ризобиальные агглютинины повышают активность гидролитических ферментов корней проростков гороха. Агглютинины ризобий взаимодействуют с дыхательными ферментами цитоплазматической мембраны растительных клеток.

Ассоциативные бактерии облегчают существование симбиотических клубеньковых бактерий. Они продуцируют соединения, подавляющие рост патогенной микрофлоры и способствуют развитию устойчивости к фитопатогенам. Важную роль в повышении устойчивости к болезням играют эндофиты – группа бактерий, обитающих во внутренних тканях растений.

Большое значение в симбиозе эубактерий *A. brasilense* с растениями имеет фитолектин, агглютинин зародышей пшеницы (АЗП). Лектин пшеницы служит фактором коммуникации в симбиозе азоспирилл с растениями, а углевод-белковое взаимодействие необходимо для физического контакта азоспирилл с корнями растения, контакта азоспирилл друг с другом. И АЗП реализует в симбиотической системе свой «информационный потенциал», действуя для азоспирилл как биологически активное вещество.

Уникальность природного реактора фиксации азота состоит в его восстановлении до аммиака в естественных условиях без высоких температур и давлений. На следующем этапе происходит восстановительное аминирование кетокислот с образованием аминокислот. Процесс азотфиксации осуществляется с участием фермента нитрогеназы. Под ее действием при участии АТФ происходит превращение ионов водорода в молекулярный водород. Биологическим «топливом» для образования АТФ служит поли-β-оксимасляная кислота (ПОМ).

Между фиксацией азота в клубеньках и процессами фотосинтеза существует положительная связь. Масса клубеньков на корнях растет пропорционально увеличению площади листьев и скорости накопления продуктов фотосинтеза. Под действием света высокой интенсивности увеличивается масса клубеньков, возрастают фиксация азота и количество хлорофилла в листьях.  $^{14}\text{C}$  углекислого газа, ассимилированный листьями, поступает в клубеньки и включается прежде всего в сахарозу и продукты ее расщепления.

Связь между симбиотической азотфиксацией и фотосинтезом у бобовых растений наиболее отчетливо прослеживается в период скашивания надземной массы. После укоса клубеньки лишаются основного источника энергии, в них происходят структурные и функциональные изменения, в итоге существенно (в 8–25 раз) снижается азотфиксация. По мере отрастания надземных органов идет восстановление азотфиксирующей активности. Долголетие использования травостоев зависит от экологической устойчивости ризобиального комплекса.

Тесная связь между фотосинтезом и азотфиксацией существует и при ассоциативном взаимодействии микроорганизмов и растений. На обеспечение энергией ассоциативной азотфиксации расходуется 25–37% углерода, потребляемого растениями в процессе фотосинтеза. Субстратом для азотфиксации служат корневые выделения и корнеопад. Межорганизменный обмен метаболитами в результате экзосмоса является экологически целесообразным процессом. Активизация процессов азотфиксации приводит к усиленному оттоку азотсодержащих метаболитов бактериальных клеток и повышению активности нитрогеназы.

Азотфиксация – экологически безопасный процесс вовлечения свободного азота атмосферы в круговорот веществ и энергии на Земле. Ежегодная азотфиксация на планете оценивается в 169–209 млн т азота. В общем балансе биологического азота основную долю составляет азот, фиксированный клубеньковыми бактериями на корнях бобовых растений, а 1/3 приходится на долю азота, фиксированного ассоциативными микроорганизмами.

Потенциальные размеры симбиотической азотфиксации могут достигать 130–190 кг N/га зернобобовыми культурами и 270–550 кг N/га многолетними бобовыми травами. За счет симбиотической азотфиксации горох, вика и чина могут фиксировать до 150 кг N/га; клевер, соя, бобы, люпин – до 250 кг N/га, а козлятник и люцерна – свыше 500 кг N/га. В зависимости от вида бобовых культур в их ПКО накапливается следующее количество азота, кг N/га: чина – 10–15; вика, горох, нут – 17–35; люпин, бобы, соя – 19–63; клевер – 49–285; люцерна (при орошении) – 64–786. Растительные остатки активизируют деятельность азотфиксаторов.

За счет ассоциативной микрофлоры в посевах небобовых культур фиксируется 10–80 кг N/га. Ассоциативная азотфиксация способствует образованию клубеньков на корнях бобовых растений и усиливает симбиотическую азотфиксацию. В природных экосистемах на дерново-подзолистой почве за счет ассоциативных азотфиксаторов фиксируется 10–55 кг N/га.

Велика агроэкологическая роль бобовых растений в устойчивом развитии современных агроэкосистем:

- обладая средообразующим эффектом, они повышают плодородие почвы и предотвращают ее деградацию;
- обеспечивают эффективный путь секвестирования углерода и оптимизации циклов азота, гарантируя устойчивое развитие агрофитоценозов;
- снижают антропогенную нагрузку на агроэкосистему (применение азотных минеральных удобрений и пестицидов) и повышают ее биологическое разнообразие;
- служат субстратом в жизнедеятельности микроорганизмов, регулируя мобилизацию и иммобилизацию элементов питания;
- обеспечивают получение экологически безопасной продукции растениеводства и животноводства.

Изменение плодородия почвы зависит от вида и длительности выращивания бобового растения, способа выращивания (поле севооборота, промежуточная или пожнивная культура, сидеральный пар), количества и качества биомассы и ПКО. В зависимости от комплекса факторов при использовании бобовых растений содержание гумуса в почве повышается на 0,16–1,2%. Последствием биологического азота может достигать трех лет и существенно зависит от генотипа макросимбионта и вида инокулянта.

В качестве сидеральных культур бобовые растения включают в чистые и смешанные посевы. Кроме удобрения и энергосбережения, бобовые сидераты выполняют фитосанитарную функцию. Для них характерно более узкое соотношение углерода к азоту (30–40:1), что стимулирует рост бактерий, тогда как злаковым культурам свойственно более широкое соотношение C:N (50–85:1), которое обеспечивает устойчивое развитие грибов.

Под действием фитомассы бобового сидерата меняется состав микробиоценоза. Через 20 сут после внесения биомассы люпина в почву численность неспоровых бактерий возрастает в 7–10 раз, споровых – в 12–15, а грибов – в два раза. Растет численность тех групп микроорганизмов, которые участвуют в метаболизме органического вещества сидерата. В процессе разложения биомассы происходят не только распад и минерализация органических веществ, но и образование новых соединений. Скорость разложения фитомассы контролируется содержанием азота и соотношением углерода к азоту. Внесение фитомассы с узким соотношением C:N (бобовые культуры) обеспечивает более быстрое обогащение почвы гумусом.

Водорастворимое органическое вещество определяет не только потенциальное, но и эффективное плодородие почвы, поскольку уровень его содержания тесно связан с количеством гуминовых кислот и общего гумуса. От сидерации зависит и групповой состав гумуса: растет суммарное количество Сг.к. на 20–30% (за счет фракций, связанных с кальцием и полуторными оксидами). При разложении биомассы люпина увеличивается количе-

ство гуминовых кислот и негидролизуемого остатка, снижается содержание фульвокислот. Биомасса клевера, в отличие от фитомассы люпина, в большей степени способствует образованию гуминовых кислот.

Благодаря корневой системе бобовые растения способны потреблять значительное количество элементов (110–250 кг/га кальция, 14–22 кг/га магния, 20–25 кг/га фосфора) из трудноусвояемых соединений почвы. Бобовые растения повышают эффективность их участия в продукционном процессе и существенно снижают потери. При использовании бобового сидерального пара возрастает содержание в почве нитратов, подвижного фосфора и калия. При запашке биомассы гороха в ней накапливается большее количество подвижного фосфора и калия по сравнению с чистым унавоженным паром. При мелкой заделке биомассы донника фиксируется накопление большего количества нитратного азота.

Наиболее эффективно люцерна воздействует на агрофизические свойства почвы на третий год жизни: возрастает количество водопрочных агрегатов – на 58–62%. В условиях севооборота под действием бобовых трав коэффициент структурности за 8 лет увеличился в 3,2 раза.

Основное количество фитомассы бобовых растительных остатков (60–90%) разлагается в первый год после их запашки. Растительные остатки смешанных посевов разлагают значительно сильнее.

Растительные остатки повышают подвижность фосфатов в почве, влияют на соотношение в ней процессов минерализации и иммобилизации азота. При внесении растительных остатков значительное количество азота ассимилируется микроорганизмами, основное количество (50–70%) закрепляется в почве. При этом существенно (в три раза) сокращаются газообразные потери. Потери азота биомассы бобовых растений (8–36%) в два раза меньше потерь азота минеральных удобрений. В зависимости от почвенно-экологических условий баланс азота бобовых культур складывается следующим образом: 18–31% используется выращиваемой культурой, 42–69% закрепляется в почве, и 10–40% теряется в виде газообразных соединений. При применении минеральных удобрений (меченных  $^{15}\text{N}$ ) баланс азота складывается следующим образом: 24–51, 19–36, 30–40% соответственно.

При поступлении в почву фитомассы стимулируется развитие зимогенной и автохтонной микрофлоры. Органическое вещество с широким соотношением C:N (навоз, сидераты) формирует более активное и разнообразное сообщество микроорганизмов. Корни бобовых трав с более узким соотношением углерода к азоту минерализовались быстрее, чем корни злаковых трав. По мере сужения соотношения C:N усиливается иммобилизация азота в почве. Чем выше размеры иммобилизации азота фитомассы в почве, тем ниже газообразные потери ее азота.

Растительные бобовые остатки стимулируют минерализацию и иммобилизацию азота почвы одновременно. Использование возделываемой культурой и газообразные потери азота идет более эффективно с повышением дозы и со снижением отношения углерода к азоту. По мере повышения соотношения C:N усиливается иммобилизация азота растительных остатков. При совместном внесении остатков с сульфатом аммония иммобилизация

их азота снижается, а газообразные потери растут. Потери азота бобовых остатков отсутствуют при их совместном внесении с пшеничной соломой.

При 40–50%-ном насыщении полевых севооборотов многолетними бобовыми травами содержание гумуса может возрастать на 0,38–0,78% в течение длительного времени в условиях черноземных почв, а в дерново-подзолистых почвах Нечерноземья создается бездефицитный баланс гумуса. Корневая система многолетних бобовых трав повышает количество водопрочных агрегатов в почве.

При использовании покровных бобовых культур (люпин узколистный, кормовые бобы в чистых и смешанных с тритикале посевах) повышается количество минерального азота и других элементов питания в почве. Содержание элементов питания в почве увеличивается на 40%, а продуктивность многолетних трав – на 28%, что снижает частоту проведения азотных подкормок.

Процесс лектин-углеводного взаимодействия лежит в основе механизма фиксации молекулярного азота бобовыми растениями. Лектины обеспечивают специфические реакции партнеров при формировании клубеньковых симбиотических систем. Взаимодействие растения с бактериями – многоступенчатый процесс образования лектин-углеводных и лектин-лектиновых связей. Агглютинины ризобий взаимодействуют с дыхательными ферментами цитоплазматической мембраны растительных клеток. Ассоциативные бактерии облегчают функционирование симбиотических клубеньковых бактерий. Лектин пшеницы служит фактором коммуникации в симбиозе азоспирилл с растениями.

Симбиотическая система является уникальным природным реактором превращения молекулярного азота в аммиак в естественных условиях. Процесс азотфиксации происходит при непосредственном участии АТФ и нитрогеназы. Симбиотическая и ассоциативная азотфиксация тесно связана с фотосинтезом.

Ежегодная азотфиксация на планете Земля оценивается в 160–200 млн т азота, из которых 1/3 фиксируется ассоциативными микроорганизмами. Потенциальные размеры симбиотической азотфиксации могут достигать 130–190 кг N/га зернобобовыми культурами и до 270–550 кг N/га – многолетними бобовыми травами. В ПКО бобовых накапливается 10–790 кг N/га. За счет ассоциативной микрофлоры небобовые культуры фиксируют 10–80 кг N/га.

Бобовые растения, обладая средообразующим и секвестирующим эффектом, энергосбережением, оптимизацией циклов углерода и азота, обеспечивают устойчивое развитие агроэкосистем. Более узкое соотношение C:N у бобовых стимулирует рост и развитие бактерий и новообразование гумуса, меняет качественный его состав. Благодаря корневой системе бобовые растения повышают эффективность участия элементов питания в продукционном процессе. При внесении биомассы бобовых растений в почву (сидерации) основное количество ее азота (50–70%) закрепляется в почве. Растительные бобовые остатки стимулируют минерализацию и иммобилизацию азота почвы одновременно. Азотный режим почв регулируют покровные бобовые культуры.

## **Глава 3. Экология симбиотической и ассоциативной азотфиксации**

### **3.1. Природные факторы**

При повышении эффективности симбиоза растений и микроорганизмов почва выполняет целый ряд функций: активационную, регуляторную, трофическую. На ранних этапах развития растений за счет запасов минерального азота почва активизирует процессы фотосинтеза (ассимиляцию углерода) и азотфиксации (фотоассимиляты).

Соотношение процессов азот-мобилизующей и азот-иммобилизующей способности почвы определяет уровень ее азотного режима и регулирует степень влияния на симбиотическую азотфиксацию. В процессах минерализации и иммобилизации участвует почвенный микробиоценоз, степень вовлеченности которого обусловлена экологическими факторами: количеством и качеством органического вещества, запасом и составом минерального азота и зольных элементов, гидротермическим режимом, гранулометрическим составом, реакцией среды, рельефом местности. Органический азот почвы, в отличие от минерального азота, не оказывает токсического действия на бобовые растения даже в условиях засухи. В таком случае тормозится процесс минерализации органического азота почвы, и симбиотический аппарат не страдает от избытка минерального азота. При выпадении осадков интенсифицируются процессы трансформации азота в почве, что ведет к накоплению минерального азота и подавлению процессов биологической азотфиксации.

Трофическая функция почвы обеспечивается общим вкладом азота почвы в его потребление бобовыми растениями. Соотношение азота почвы и атмосферного азота в его общем потреблении зависит от многих факторов. Доля азота почвы в общем выносе азота бобовыми растениями колеблется в пределах 15–25%. При неблагоприятных условиях доля атмосферного азота может существенно снижаться вплоть до полного перехода на потребление азота почвы. В трофическую почвенную функцию входит также и несимбиотическая азотфиксация.

#### **3.1.1 Тип и влажность почвы**

Активность азотфиксирующих микроорганизмов в значительной степени определяется теми условиями, в которых они обитают. Так, в зависимости от типа почвы формируется структура микробиоценоза: 2–4 вида ди-

азотрофов в подзолистых почвах, 15 – в серых лесных почвах и 21–26 – в черноземных. Высокой азотфиксирующей способностью отличаются почвы с максимальным содержанием азота и гумуса (Александрова, Люжин, 1966; Клевенская, 1978; Калининская, 1982). Максимальной активностью азотфиксации отличаются выщелоченный и типичный черноземы: 1,83 и 1,21 мг N/кг почвы соответственно (Хазиев, Наумов, 1979). В генетическом горизонте А дерново-средне-и слабоподзолистой почвы Западной Сибири азотфиксация достигала 5,3–10,3 кг N/га, тогда как в различных черноземах – 9,6–36,0 кг N/га (Клевенская, 1978). По более поздним данным, за счет несимбиотической азотфиксации в почву за сезон поступает, кгN/га: подзолы – 2,3; подзолистые – 6,1; дерново-подзолистые – 2,2–10,3; черноземы – 9,6–36; каштановые – 12 (Клевенская, 1991). В овощекартофельном севообороте ежегодно за счет несимбиотической азотфиксации участвует до 80 мг N/кг почвы (Назарюк, 2002).

Различные почвы отличаются уровнем ассоциативной азотфиксации, мало зависящей от содержания гумуса (табл. 3.1.1.1). Активность азотфиксации почв повышается при переходе от северных широт к южным (Мишустин и др., 1978) (табл. 3.1.1.2).

Таблица 3.1.1.1 – Потенциальная азотфиксирующая активность в основных типах почв (Умаров, 1986)

Почва, регион	Азотфиксация, кг/га·год
Дерново-подзолистые, Московская обл.	38–192
Серые лесные, Тульская, Московская обл.	48–216
Черноземные почвы, Курская, Воронежская, Тамбовская обл.	90–312
Каштановые почвы, Ростовская обл.	135–330
Сероземы, Ашхабадская обл.	215–516
Солончаки, солонцы, Ростовская, Воронежская обл.	69–540

Таблица 3.1.1.2 – Активность несимбиотической азотфиксации в основных типах почв (Мишустин и др., 1978)

Почва	Азотфиксация, кг/га год
Дерново-подзолистые	10–13
Серые лесные	18–30
Черноземы	37–53
Каштановые	18–30
Сероземы	18–30

В естественных условиях для каждого типа почвы характерны свои растительные сообщества. Первыми поселенцами на подзолах горнотундрового пояса Хибин из цветковых растений становятся бобовые (астрагал субарктический и остролодочник грязноватый), которые за счет фиксации молекулярного азота восполняют недостаток минерального азота в почве (Егоров, Плотникова, 2000). На корнях этих видов бобовых клубеньки образуются повсеместно. Так, в надземной массе астрагала и остролодочника в период цветения – формирования бобов содержание общего азота достигало 3%. Именно в этот период достигала максимума азотфиксация, на активность которой существенно влияла влажность почвы (табл. 3.1.1.3).

Таблица 3.1.1.3– Динамика нитрогеназной активности бобовых растений, мк·моль С<sub>2</sub>Н<sub>4</sub>/раст.·сут (Егоров, Плотникова, 2000)

Фаза развития	Астрагал	Остролодочник
Вегетативная	0,01	0,03
Бутонизация	0,07	0,17
Цветение	0,31	0,16
Формирование бобов	0,14	0,44
Зрелые бобы	0,04	0,04

Значительное количество азота, фиксированного бобовыми растениями, накапливается в корневой системе, что сказывается на азотном режиме почвы. При выращивании суперклубенькового мутанта гороха К-10а на серой лесной и черноземно-луговой почвах накапливалось большое количество минерального азота и азота микробной биомассы, обладающей пролонгированным действием при питании азотом последующих культур (Назарюк, 2007).

На кислых суглинках коэффициент азотфиксации клевера гибридного и лядвенца рогатого превышал 70% (Fustec, Bernard, 2008). На более легких почвах (50% ила и 30% песка) коэффициент азотфиксации снижался и составил у клевера и лядвенца 22–81% и 19–48% соответственно. В условиях дерново-подзолистой почвы (рН 6,2–7,1; Гм 1,7–2,3%) наибольшей азотфиксирующей способностью отличались клевер луговой (коэффициент азотфиксации 69–89%) и люцерна пестрогибридная (65–82%), несколько меньшей – козлятник (65–79%) и лядвенец рогатый (50–79%) (Конончук, 2007). На второй год жизни бобовых трав азотфиксация сильно подавлялась из-за большого количества осадков и высокого увлажнения воздуха.

Интенсивность процессов связывания атмосферного азота горохом обусловлена типом почвы (табл. 3.1.1.4). На черноземе растения потребляли азота на 17% больше, чем на дерново-подзолистой почве, что происходило, скорее всего, за счет азота почвы, поскольку доля азота атмосферы на обоих типах почвы оставалась на уровне 71,4 и 71,8% соответственно (Гудинова, 1972).

Таблица 3.1.1.4– Симбиотическая фиксация азота растениями гороха на различных типах почв (Гудинова, 1972)

Вариант	Чернозем выщелоченный		Дерново-подзолистая	
	Азот атмосферы, г/сосуд	%	Азот атмосферы, г/сосуд	%
Контроль	0,364	67,4	0,336	69,6
Нитрагин	0,413	70,7	0,378	71,7
Нитрагин + P <sub>100</sub>	0,480	73,4	0,419	74,2
Нитрагин+P <sub>100</sub> +Mo	0,498	74,1	0,372	71,7

Инокуляция и удобрения повышали азотфиксацию растениями гороха, тогда как под действием молибдена на дерново-подзолистой почве она снижалась. Азотфиксация растениями гороха снижалась еще сильнее при внесении полного минерального удобрения (N<sub>30</sub>P<sub>100</sub>K<sub>100</sub>).

Лучшее развитие фотосинтетического аппарата у растений способствует активизации процессов ассоциативной азотфиксации. В этом состоит эко-

логический смысл корневых выделений и опада (Годова и др., 1983; Умаров и др., 1984; Умаров, 1986). Выделение углеродсодержащих соединений позволяет растениям сдвигать экологическое равновесие в почве в сторону оптимизации процессов азотфиксации. Поступление азота в растение связано с образованием углеродсодержащих соединений.

В период вегетации наряду с процессами использования растениями азота удобрения идут процессы иммобилизации и денитрификации, снижающих количество доступных форм азота в почве. Наиболее активно они протекают в ризосфере. Растения, получающие большее количество азота в начальный период развития, формируют лучший фотосинтетический аппарат, мобилизуют больше азота воздуха.

С другой стороны, при наличии легкоподвижных форм азота усиливается минерализация органического вещества почвы, что, несомненно, имеет экологическую значимость. Под действием корневых выделений и опада усиливается минерализация органического вещества почвы (явление кометаболизма). В результате минерализации органического вещества в ризосфере азот гумуса переходит в подвижное состояние и используется растениями.

По мере снижения количества легкодоступного азота в прикорневой зоне активизируется фиксация азота бактериями. Усиление процессов фотосинтеза стимулирует деятельность микроорганизмов – азотфиксаторов, обеспечивая приток подвижных форм азота к корням растений.

Количество  $\text{CO}_2$  в воздухе является одним из параметров, определяющих продуктивность фотосинтеза у растений. В период интенсивного роста они синтезируют 360–380 кг/га сухого вещества за сутки, для этого необходимо 720 кг  $\text{CO}_2$  (Шатилов, Вербицкая, 1973). В то же время в воздухе над 1 га поля содержится только 5 кг  $\text{CO}_2$ , поэтому необходимо постоянный приток углекислоты. Продуктивность фотосинтеза увеличивается в 1,5 раза при удвоении содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Повышенная концентрация  $\text{CO}_2$  в воздухе стимулировала активность симбиотической азотфиксации и повышала продуктивность бобовых культур (Hardy, 1973). Повышение концентрации  $\text{CO}_2$  в три раза обеспечивало увеличение азотфиксации у сои с 75 до 424 кг  $\text{N}_2$ /га, что сопровождалось нарастанием массы клубеньков, снижением фотодыхания и увеличением потоков фотоассимилятов в клубеньки.

Дополнительное поступление  $\text{CO}_2$  повышает активность ассоциативной азотфиксации риса, при этом для ее функционирования необходимо 25–30% ассимилированного растениями углерода (Мишустин, Шильникова, 1968). Оптимизировать потоки  $\text{CO}_2$  возможно при внесении в почву органических удобрений (навоз, компосты, солома, растительные остатки). Так, разложение растительных остатков сопровождается интенсивным выделением  $\text{CO}_2$  (Станков, 1964). Наибольшее количество  $\text{CO}_2$  выделяется в начале процесса. При разложении остатков бобовых культур выделяется больше  $\text{CO}_2$  по сравнению с остатками злаковых культур. К десятой декаде процесс разложения остатков бобовых и злаковых культур проходит на одном уровне.

Зависимость фотосинтеза кормовых бобов от количества  $\text{CO}_2$  выражается логарифмической кривой с максимумом насыщения при 0,3%  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Максимум фотосинтеза у бобов наступает при ассимиляции 60 мг  $\text{CO}_2$ /дм<sup>2</sup>·ч (Полевой, 1989). Установлены разнонаправленные зави-

симости скорости эмиссии CO<sub>2</sub> от влажности почвы: прямая – в пределах низкой влажности до умеренной и обратная – от умеренной до избыточной (Задорожный и др., 2010).

На активность диазотрофов существенное влияние оказывает соотношение углерода и азота в растительных остатках (Клевенская, 1974, 1978; Мозжорин, 1976; Родынюк, 1979; Берестецкий, 1984; Negazi, 1983). Остатки бобовых культур повышают активность азотфиксации в первые две недели после их внесения, тогда как остатки злаковых культур поддерживают процесс более продолжительное время. На 1 г потребляемой микроорганизмами целлюлозы фиксируется 6–19 мг азота (Наплекова, 1974). На 1 т соломы, внесенную в почву, дополнительно связывается 5 кг азота атмосферы. Таким образом, процессы азотфиксации и ассимиляции углерода растениями тесно взаимосвязаны и изменение в одном из них ведет к изменениям в другом, влияя на обмен веществ и продуктивность растений.

Бобовые являются влаголюбивыми культурами, расходующими большое количество воды на транспирацию при формировании единицы сухого вещества (единиц воды) (Трепачев, 1999): в частности клевер 310-900, фасоль 700-800, люпин 600-700, горох 500-600, люцерна 700-800 и вика 400-500.

Люцерна отличается высокой засухоустойчивостью и исключительной отзывчивостью на увлажнение, поэтому она формирует высокие урожаи сена и семян при орошении. Размеры фиксации азота атмосферы горохом изменяются в зависимости от погодных условий.

Таблица 3.1.1.5– Размеры и коэффициент фиксации азота горохом в зависимости от погодных условий и состава минеральных удобрений (Трепачев, 1999)

Вариант	Холодный и дождливый год		Засушливый год		Благоприятный год		Среднее за три года	
	N атм., кг/га	Кф, %	N атм., кг/га	Кф, %	N атм., кг/га	Кф, %	N атм., кг/га	Кф, %
Без удобрений	61,3	64	15,8	49	55,4	50	44,2	54
P <sub>60</sub>	59,9	61	13,0	34	66,7	46	46,5	47
P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	23,3	53	17,4	39	75,5	48	48,7	47
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	44,4	39	26,1	36	15,0	9	28,5	23

При недостатке влаги снижалась в 2,6 раза фиксация азота горохом, при этом коэффициент падает в 1,4 раза (табл. 3.1.1.5). Наиболее сильно (в 4,6 раза) снижалась фиксация азота растениями на фоне P<sub>60</sub>. Наибольшей фиксирующей активностью обладали растения в благоприятный год на фоне P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>. Внесение 60 кг N/га существенно (в пять раз) снижало фиксацию азота и коэффициент фиксации, что, по-видимому, связано с усилением процессов аммонификации и нитрификации и накоплением минерального азота в почве после засушливого года. Наибольшим коэффициентом фиксации азота отличаются растения на фоне без удобрений (49–64%).

Оптимальной влажностью почвы образования клубеньков считается 40–80% от полной полевой влагоемкости (Сидорова, 1973; Назарюк, 2007). Уровень критической влажности для растения и для формирования клубеньков неодинаков для различных видов бобовых (Мишустин, Шильникова, 1968; Сидорова, 1991; Сидорова и др., 2006).

При дефиците влаги снижаются: число и масса клубеньков, нитрогеназная активность и выделение  $\text{CO}_2$ , количество фиксированного азота, общее потребление азота, масса самого растения; формируется слабый симбиотический аппарат или клубеньки отмирают вовсе (Бегун, 1976; Клевенская, 1978; Мошкова, 1982; Андреева, 1998; Лазарев и др., 2017; Hardy, 1973; Kirda, 1989).

В засушливый период на дерново-подзолистой почве (без применения азотных удобрений) люцерна формировала более высокий урожай сена, чем костреч и намного больше усваивала азота благодаря растению-хозяину, а не активности ризобий. В этот период симбиоз в большей степени зависит от корневой системы люцерны, а не от *Rhizobium meliloti* (Проворов и др., 1989; Трепачев, 1999). В засушливый период на черноземных почвах (ЦЧР) люцерна фиксировала большее количество атмосферного азота по сравнению с клевером. В то же время нередко повторяющиеся в ЦЧР засушливые периоды весенне-летних сезонов хотя и подавляют симбиотическую азотфиксацию, но не прекращают ее полностью, поэтому продуктивность гороха выше, чем ячменя. В условиях засухи резко снижается эффективность бактериальных препаратов.

По мере повышения влажности почвы растет биологическая азотфиксация, однако реакция диазотрофов на изменение влажности в разных почвах неодинакова. С повышением влажности в дерново-подзолистой почве активность азотфиксации растет медленнее по сравнению с ее темпами в почвах лесостепной и степной зон (Клевенская, 1976). При избытке влаги в почве (интенсивное выпадение осадков) замедляется образование клубеньков на корнях люцерны и снижается активность азотфиксации (Трепачев, 1999).

С изменением влажности дерново-подзолистой почвы растет активность ассоциативной азотфиксации (АА). При повышении влажности почвы с 8 до 19% АА меняется незначительно (от 0,72 до 0,90 мг  $\text{N}_2/\text{кг}$  почвы·ч) (Умаров, 1986). При дальнейшем повышении влажности от 20 до 40% (от -1,5 до -0,25 МПа) АА растет пропорционально (примерно в 50 раз), затем рост активности выходит на плато и практически не меняется.

Наиболее благоприятными для ассоциативной азотфиксации являются не полностью анаэробные условия (Калининская и др., 1977). По-видимому, повышение активности азотфиксации в таковых связано с активизацией факультативно-анаэробных бактерий-диазотрофов (Mishustin, Emtser, 1982). Насыщение почвы влагой может влиять на микробиологическую активность не только вследствие снижения парциального давления кислорода, поскольку вода является регулятором ферментативного катализа (подвижность активных центров ферментов). Скорее всего, при иссушении почвы снижается активность нитрогеназы, в результате чего падает азотфиксирующая активность. У люцерны это наблюдалось и при переувлажнении почвы (Трепачев, 1999).

Масса клубеньков на корнях люцерны в засушливый год (1-го укоса) снижалась в 3–5 раз, а активность азотфиксации – в 5–8 раз по сравнению с влажным годом (табл. 3.1.1.6).

Таблица 3.1.1.6– Влияние погодных условий и удобрений на накопление сухого вещества клубеньками люцерны и интенсивность азотфиксации (Трепачев, 1999)

Вариант	Очень влажный год		Засушливый год	
	1-й укос	2-й укос	1-й укос	2-й укос
<i>Сухое вещество клубеньков, г/м<sup>2</sup></i>				
Фон	23,6	9,5	9,5	5,2
Фон+P <sub>180</sub> K <sub>270</sub>	39,9	8,5	7,8	3,7
Фон+N <sub>72</sub> P <sub>180</sub> K <sub>270</sub>	20,8	5,5	7,2	4,0
<i>Фиксация азота, мкг/мг клубеньков·ч</i>				
Фон	0,23	0,15	0,05	0,05
Фон+P <sub>180</sub> K <sub>270</sub>	0,36	0,16	0,05	0,06
Фон+N <sub>72</sub> P <sub>180</sub> K <sub>270</sub>	0,25	0,08	0,03	0,04
<i>Фиксация азота, мг/м<sup>2</sup>·ч</i>				
Фон	6,05	1,46	0,51	0,26
Фон+P <sub>180</sub> K <sub>270</sub>	14,75	1,35	0,39	0,22
Фон+N <sub>72</sub> P <sub>180</sub> K <sub>270</sub>	5,20	0,43	0,22	0,17

Наиболее заметно (в 5 раз) масса клубеньков снижалась на фоне фосфорных и калийных удобрений, а азотфиксация (в 8 раз) на фоне полного минерального удобрения. Во 2-й укос люцерны в засушливый год масса клубеньков снижалась в 1,4–2,3 раза, а азотфиксация – в 2–3 раза.

В засушливые годы отсутствие клубеньков на корнях бобовых растений вызвано следующими причинами: усиленное опробкование корней, в том числе и мелких; недостаточный уровень в корнях сахаров, синтезированных в листьях; подавление внедрения клубеньковых бактерий в корни вследствие отсутствия воды, в которой они передвигаются с помощью жгутиков (Андреева, 1998).

Во влажный год (1-й укос) наибольшую массу клубеньков растения формировали на фоне фосфорных и калийных удобрений. Та же закономерность сохраняется и для азотфиксации. Во 2-й укос наибольшая масса клубеньков формировалась у люцерны на РК-фоне и без удобрений. То же происходило с растениями и в засушливый год при проведении двух укосов.

Таблица 3.1.1.7 –Урожайность и качество зеленой массы клевера лугового второго года пользования в зависимости от влажности почвы (Дронова, Карпов, 2013)

Предполивая влажность почвы, % НВ	Расчетные дозы удобрений, кг д.в./га	Урожайность зеленой массы, т/га	Сырой белок, %
60	Без удобрений	32,3	13,4/14,0
	N <sub>100</sub> P <sub>90</sub> K <sub>75</sub>	44,1	-
	N <sub>135</sub> P <sub>120</sub> K <sub>100</sub>	58,2	15,5/16,2
70	Без удобрений	38,2	14,2/15,6
	N <sub>100</sub> P <sub>90</sub> K <sub>75</sub>	55,2	-
	N <sub>135</sub> P <sub>120</sub> K <sub>100</sub>	72,5	17,2/17,6
80	Без удобрений	41,5	14,4/16,9
	N <sub>100</sub> P <sub>90</sub> K <sub>75</sub>	62,5	-
	N <sub>135</sub> P <sub>120</sub> K <sub>100</sub>	85,0	17,8/19,9

Примечание: в числителе – 1-й укос, в знаменателе – 3-й укос.

В условиях теплообеспеченности Нижнего Поволжья (каштановая почва) клевер луговой формирует три полноценных укоса: в 1-й укос – 45%, во 2-й укос – 35% и в 3-й укос – 20% общего урожая зеленой массы (Дронова, Карпов, 2013). При этом содержание сырого белка в зеленой массе от 1-го к 3-му укосу повышается на 0,57–13,87% вследствие изменений светового и температурного режимов полуденных часов суток. Наибольший урожай массы клевер формировал при 80% НВ на фоне  $N_{135}P_{120}K_{100}$  (дозы удобрений за три укоса) (табл.3.1.1.7). При снижении влажности почвы до 60% НВ продуктивность клевера уменьшилась в 1,4 раза, тогда как содержание сырого белка в зеленой массе – в 1,1–1,2 раза. Итак, рациональное сочетание водного и пищевого режимов почвы обеспечивает формирование высокого урожая клевера.

Повышение влажности светло-каштановых почв до 80% НВ сопровождалось усилением фиксации атмосферного азота клевером луговым на 20% (табл. 3.1.1.8). При этом увеличивалось накопление биологического азота в ПКО клевера на 20–22%. С повышением доз минеральных удобрений (на всех режимах влажности почвы) клевер фиксировал на 18–20% больше азота атмосферы. Фиксация азота клевером создавала бездефицитный баланс элемента в агрофитоценозе.

Таблица 3.1.1.8 – Симбиотическая азотфиксация клевера лугового в зависимости от влажности почвы и условий питания, кг/га (Дронова и др., 2012)

Предполивная влажность почвы, % НВ	Вариант опыта	Симбиотическая азотфиксация	
		Общая	Поживные остатки
60	без удобрений	195	39
	$NPK_1$	202	40
	$NPK_2$	225	45
	$NPK_3$	232	46
70	без удобрений	218	43
	$NPK_1$	229	45
	$NPK_2$	251	50
	$NPK_3$	260	52
80	б/у	233	47
	$NPK_1$	245	49
	$NPK_2$	270	54
	$NPK_3$	278	56

Наибольший урожай злаковые травы и клевер формировали в первые два шестилетние периоды при двухукосном использовании, что обеспечивалось влажной погодой (табл. 3.1.1.9).

Во второй период у клевера ползучего продуктивность снижалась на 23%, тогда как у клевера лугового – повышалась на 53% по сравнению с первым периодом. В третий период произошло снижение продуктивности клевера ползучего в 2,4 раза, из-за засухи в 2010-м, тогда как у клевера лугового, несмотря на падение продуктивности в том году, оно было компенсировано урожаями в 2011–2014 годы. В результате урожай сухого вещества вырос на 6% (Лазарев и др., 2017).

Таблица 3.1.1.9 – Урожайность трав в зависимости от погодных условий, т/га (Лазарев и др., 2017)

Травы	Годы			Среднее за 18 лет
	1997–2002	2003–2008	2009–2014	
Злаки (кострец, тимофеевка)	3,7	4,1	2,4	3,4
	3,2	3,2	2,0	2,8
Злаки + 90 кг N/га	5,8	7,1	4,8	5,9
	4,7	5,1	4,1	4,6
Клевер ползучий	4,4	3,4	1,8	3,2
	4,2	3,0	1,9	3,0
Клевер луговой	3,2	4,9	3,4	3,8
	2,7	4,1	2,7	3,2

Примечание: в числителе – двухукосное использование; в знаменателе – трехукосное.

Разные виды бобовых трав неодинаково реагируют на влажность почвы. Так, при 60% ПВ козлятник формирует основное количество корней в 0–20-сантиметровом слое почвы (Абдушаева и др., 2008). Меньше всего на изменение погодных условий реагировала корневая система люцерны: даже в засушливых условиях она интенсивно развивалась в метровом слое почвы.

С повышением влажности почвы (в 200-метровой зоне возле лесных полос) люцерна формировала более мощную корневую систему, в которой накапливалось 129 кг/га азота даже без инокуляции семян (Дронова и др., 2011). Повышение влажности у лесополос в условиях светло-каштановых почв в корнях люцерны дало увеличение накопления азота в 1,4 раза без инокуляции семян и в 1,5 раза при инокуляции.

Бобовые растения относятся к экологической группе мезофитов. По степени засухоустойчивости культурные виды делятся на три группы. К первой группе, наиболее устойчивых к засухе, относятся: просо, сорго, нут, чина, чечевица, донник, люцерна желтая, житняк, суданская трава. Ко второй группе, со средней устойчивостью к засухе: пшеница, ячмень, рожь, кукуруза, чечевица, фасоль, арахис, вика, люцерна синяя. В третью группу – виды со слабой устойчивостью к засухе – входят: рис, овес, горох, соя, бобы, маки (Вавилов, 1957; цит. по: Новикова, Зотиков, 2015).

Устойчивость к засухе у различных видов растений определяется биологическими, морфологическими и физиолого-биохимическими особенностями растений. Так, нут и чина относятся к растениям, фотосинтезирующим по  $C_3$ -пути, тогда как просо и сорго – по  $C_4$ -пути, обеспечивающему обитание в жарких и засушливых регионах. В основе адаптации к засухе лежит способность растений переключать путь усвоения их  $CO_2$  с  $C_3$ -пути на САМ-путь. При поступлении сигнала в ядро происходят изменения экспрессии генов, кодирующих ферменты САМ-пути (ФЕП-карбоксилаза), что позволяет расходовать воду в 3–5 раз экономнее, чем у растений с  $C_3$ -пути.

Устойчивость растений к засухе повышают стрессовые белки-дегидрины (LEA-белки), которые удерживают воду в клетке и защищают от деградации ее структуры. Другие белки (шапероны) предохраняют потери воды молекулами ДНК. При водном дефиците усиливается образование пролина, который способствует удержанию воды в клетке, предотвращает разруше-

ние гидратных оболочек молекул белков, повышает оводненность и стабилизирует структуру мембран.

Наибольшей устойчивостью к засухе обладают хлоропласты: они теряют воду медленнее, чем клетка в целом, и могут служить запасным фондом влаги. Поэтому при засухе скорость фотосинтеза падает не столь быстро. В условиях засухи накапливаются ингибиторы роста (абсцизовая кислота, этилен) и подавляется синтез регуляторов роста (ауксины, гиббереллины), в результате чего происходит торможение роста клеток растяжением и роста растения в целом. При этом устьица листьев закрываются,  $\text{CO}_2$  в них поступает меньше, как следствие – интенсивность фотосинтеза уменьшается.

Засуха приводит не только к снижению продуктивности растений, но и к ускорению прохождения ими этапов онтогенеза: они раньше переходят к цветению и плодообразованию. Засухоустойчивые виды отличаются высокой способностью цитоплазмы удерживать воду и переносить высокое осмотическое давление клеточного сока.

Для повышения засухоустойчивости бобовых растений важны соблюдение технологий их выращивания и проведение мероприятий по сохранению влаги в почве (севообороты с черными парами, варьирование сроков посева, кулисные посевы, мульчирование почвы, лесные полосы, противэрозийные приемы). Фосфорные и калийные удобрения повышают устойчивость растений к засухе, тогда как азотные – несколько снижают ее. Также актуально выведение новых сортов бобовых растений с высокой засухоустойчивостью.

### 3.1.2 Влияние температуры

Важную роль во взаимоотношениях азотфиксирующих микроорганизмов и растений играет температура почвы и воздуха.

Оптимальной температурой для симбиотической азотфиксации в зоне умеренного климата считается  $24^\circ\text{C}$ . Максимальной активности процесс азотфиксации достигает у сои при температуре  $20\text{--}30^\circ\text{C}$ , у гороха – при  $22^\circ\text{C}$ . При температуре ниже  $10^\circ\text{C}$  и выше  $30^\circ\text{C}$  усвоение азота атмосферы прекращается (Завалин, Соколов, 2016). Варьирование азотфиксации у гороха в зависимости от погодных факторов периода вегетации составляет  $23\text{--}59\%$  (Гамзинов, Барсуков, 1996).

При повышенной температуре и высокой влажности усиливаются процессы нитрификации азота в почве, что ведет к снижению азотфиксации у гороха (Трепачев, 1999). Тем не менее азота в клубеньках фиксировалось больше ( $75,5 \text{ кг N/га}$ ) по сравнению с низкой температурой и высокой влажностью ( $53,3 \text{ кг N/га}$ ). В засушливый год внесение азотных удобрений в составе НРК улучшало фотосинтетическую активность листьев гороха и, как следствие, не снижало темпов азотфиксации.

Большинство бобовых культур устойчивы к заморозкам: это горох, люпин, клевер, сераделла, чина, чечевица; менее устойчив люпин желтый, и не переносит их фасоль (табл. 3.1.2.1). При повышении температуры в

корнеобитаемом слое до 32°C растения (горох, люпин, вика, фасоль) лучше использовали минеральный азот, чем при 20°C (Гукова, 1962). В то же время при повышении температуры в зоне корней до 32°C фиксация атмосферного азота бобовыми культурами снижалась в 2,5–3 раза по сравнению с 20°C. Оптимальной температурой для азотфиксации у гороха являются 20°C, у сои – 24°C. При понижении температуры от оптимальной на 5°C количество фиксированного азота снижалось на 4,4%, тогда как ее повышение на 4°C снижало азотфиксацию на 49,9%. Это вызвано тем, что клубеньковые бактерии обладают большей устойчивостью к низким температурам.

Таблица 3.1.2.1 – Устойчивость бобовых культур к заморозкам в разные периоды развития (Лошаков, 2015)

Культура	Температура, повреждающая растения, °C		
	всходы	цветение	созревание
<i>Наиболее устойчивые к заморозкам</i>			
Горох	-7...-8	-2...-3	-3...-4
Чечевица	-7...-8	-2...-3	-3...-4
Чина	-7...-8	-2...-3	-2...-4
<i>Устойчивые к заморозкам</i>			
Люпин	-6...-8	-3...-4	-3...-4
Вика	-6...-7	-3...-4	-2...-4
Бобы	-5...-6	-2...-3	-3...-4
<i>Среднеустойчивые к заморозкам</i>			
Люпин желтый	-4...-5	-2...-3	-
<i>Неустойчивые к заморозкам</i>			
Фасоль	-0.5...-1	-0.5...-1	-1

Повышенная степень доступности минеральных форм азота после засушливого года вследствие усиления процессов аммонификации и нитрификации подавляла азотфиксацию гороха в благоприятный год (табл. 3.1.2.2). В благоприятный год высокой эффективностью отличалось применение фосфорных и калийных удобрений ( $P_{60}K_{60}$ ). В дождливый холодный год горох фиксировал в 1,7–4,6 раза больше атмосферного азота по сравнению с засушливым годом (Трепачев, 1999).

Таблица 3.1.2.2 – Размеры и коэффициент азотфиксации гороха в зависимости от минеральных удобрений и погодных условий (Трепачев, 1999)

Вариант	Холодный и дождливый год		Засушливый год		Благоприятный год	
	N атм., кг/га	Kф, %	N атм., кг/га	Kф, %	N атм., кг/га	Kф, %
Без удобрений	61,3	64	15,8	49	55,5	50
$P_{60}$	59,9	61	13,0	34	66,7	46
$P_{60}K_{60}$	23,3	53	17,4	39	75,5	48
$N_{60}P_{60}K_{60}$	44,4	39	26,1	36	15,0	9

Оптимальной для симбиоза считается температура 18–26°C (Мишустин, Шильникова 1973; Посыпанов, 1989; Трепачев, 1999). Однако в тундре Заполярья при температуре 0°C ряд бобовых растений (копеечник, астрагал, клевер люпинолистный) формируют активный симбиотический комплекс.

В Азиатском регионе при температуре воздуха 42°C соя, нут и маш активно фиксируют азот атмосферы.

Оптимальные условия для ассоциативных азотфиксаторов складываются при температуре 20–30°C и влажности почвы не ниже 50% ППВ (Клевенская, 1976; Земенков и др., 1984; Емцев, Ладатко, 1984; Трепачев, 1999). Лимитирующим фактором азотфиксации температура почвы становится при показателе ниже 7°C, тогда как летом в средней полосе она редко опускается ниже 10°C. Поэтому динамика азотфиксирующей активности почвы в природных условиях определяется влажностью почвы, тогда как температура в летний период заметной роли не играет (Умаров, 1986).

Песчаные, бедные азотом почвы не обеспечивают нормальные темпы роста бобовые растения до начала азотфиксации, поэтому они испытывают азотное голодание, поскольку образовавшиеся клубеньки на ранних этапах развития не в состоянии компенсировать недостаток этого элемента (Мишустин, 1985; Безносиков и др., 1989, 1991; Безносиков, 1997). В то же время бобовые растения испытывают высокую потребность в азоте на ранних этапах развития, то есть в период низких весенних температур. При пониженной температуре замедляются рост и развитие растений, их продуктивность снижается на 10–20% (табл. 3.1.2.3).

Таблица 3.1.2.3 Влияние доз минерального азота и температуры почвы в ризосфере на формирование и азотфиксирующую способность клубеньков бобовых (в расчете на три растения) (Воробьев, Пигарева, 1985).

Внесено минерального азота, мг	Температура ризосферы 23 ± 1°C		Температура ризосферы 8 ± 1°C	
	масса сухого вещества клубеньков, г	фиксировано N воздуха на 1 г сухого вещества клубеньков, мг	масса сухого вещества клубеньков, г	фиксировано N воздуха на 1 г сухого вещества клубеньков, мг
<i>Бобы кормовые</i>				
50	1,23	369,6 ± 11	1,07	349,7 ± 13
100	1,40	387,7 ± 14	1,18	367,5 ± 17
150	1,47	338,6 ± 12	1,30	372,0 ± 14
250	1,29	320,6 ± 11	1,19	328,2 ± 11
<i>Горох</i>				
50	0,85	309,3 ± 16	0,76	296,1 ± 9
100	0,83	346,8 ± 15	0,80	307,2 ± 12
150	0,79	310,2 ± 8	0,79	338,1 ± 11
250	0,76	225,2 ± 14	0,69	263,9 ± 12
<i>Вика</i>				
50	0,91	351,3 ± 9	0,89	238,0 ± 11
100	0,93	350,2 ± 13	0,92	256,3 ± 9
150	0,92	311,6 ± 12	0,96	267,9 ± 6
250	0,85	293,3 ± 9	0,96	280,6 ± 8

При понижении температуры в зоне корней азотфиксация у гороха и бобов при дозах азота 50 и 100 мг уменьшалась на 6–8%; при более высоких дозах (150 и 250 мг) она повышалась на 6–12%. У сои на всех уровнях азота при понижении температуры азотфиксация уменьшалась на 20% (Воробьев, Пигарева, 1985).

### 3.1.3 Отношение бобовых растений к кислотности почвы

Подавляющее большинство культур лучше растут и развиваются на нейтральных почвах. Исключением является люпин, растущий на почвах с низким значением рН. Оптимальными показателями рН почвы для бобовых растений являются: для гороха – 6,0–7,5; для донника – 7,0–8,7; для клевера – 6,0–6,5; для люпина – 4,0–5,0; для люцерны – 7,0–8,3; для сои – 5,5–6,5; для фасоли – 7,0–8,0 (Вальков, 1986). Ризосферные микробиоценозы участвуют в трансформации веществ, активно воздействуют на состав и кислотность почвы. При выращивании на низкоплодородной почве рН под клевером снизился с 7,0 до 4,2 вследствие значительного выделения корнями ионов  $H^+$ , количество которых превышало сумму поглощенных катионов, тогда как рН под райграсом оставался на исходном уровне (7,0).

Оптимальной для фиксации атмосферного азота является нейтральная или слабोकислая реакция среды. Клубеньки формируются при рН 4,5–6,0; оптимум – реакция среды, близкая к нейтральной. Индивидуально *Azospirillum* лучше развивается при рН 6,5–7,0; *Klebsiella* – при 6,8–7,0, *Enterobacter* – при 7,0 (Мишустин, Шильникова, 1968; Baldani, 1985).

Повышение кислотности или щелочности негативно сказывается на росте и развитии бобовых культур, негативно влияя на целый ряд процессов минерального питания. Так, при рН менее 3 и выше нарушается структура цитоплазмы клеток корней (Вальков, 1986). В щелочных условиях (рН 8,7) растения испытывают дефицит  $NO_3^-$ , фосфатов, железа, марганца, меди, цинка и избыток легкорастворимых солей. В кислых почвах перенасыщение алюминием подавляет поглощение клетками корня фосфора, кальция, калия, железа, натрия, бора вследствие ухудшения проницаемости мембран цитоплазмы. При этом развиваются клетки меристемы кончика корня с двумя ядрами (Блэк, 1973).

На кислых почвах продуктивность бобовых культур снижается неодинаково (табл. 3.1.3.1). В наибольшей степени – у донника и люцерны, в наименьшей – у сои, поскольку она ацидофил. В нейтральных и щелочных условиях лучше развиваются люцерна и донник. Влияние форм азота на рост и развитие бобовых растений тесно связано с конкуренцией ионов  $NH_4^+$  и  $NO_3^-$  с другими ионами, при этом не всегда учитывается участие в этом процессе ионов  $H^+$  и  $OH^-$  – продуктов их ассимиляции. Тем не менее градиент рН на плазмалемме поглощающих клеток корня является одной из движущих сил мембранного транспорта ионов у растений (Осмоловская, 1988, 1992; Ивашикина, 2001).

При питании аммонийной формой азота синтез сухого вещества у бобов снижался в 1,6 раза и у фасоли – в 2 раза по отношению к контролю (мочевина) (табл. 3.1.3.2).

Таблица 3.1.3.1 – Урожай бобовых культур при различных значениях рН почвы, % (Блэк, 1973)

Культура	рН				
	4,7	5,0	5,7	6,6	7,5
Люцерна	2	9	42	100	100
Донник	0	2	49	89	100
Клевер луговой	12	21	53	98	100
Клевер розовый	16	27	72	100	95
Соя	65	79	80	100	93

Таблица 3.1.3.2 – Влияние форм азота на синтез сухой массы растений фасоли и бобов (Осмоловская, 1988, 1992)

Форма азота	Вес сухой биомассы, % к контролю	
	фасоль	бобы
CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	100,0	100,0
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	49,5	63,5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	94,7	100,7

При выращивании на аммонийной форме фасоль и бобы накапливали в листьях наибольшее количество минеральных анионов и минимальное – минеральных катионов и анионов органических кислот, тогда как на нитратной форме растения содержали максимум катионов и анионов органических кислот и минимум – минеральных анионов.

Аммоний и нитраты действуют на ионный баланс бобовых как прямо, так и опосредованно – через изменение уровня рН прикорневой среды, обусловленное выделением в нее ионов Н<sup>+</sup> и ОН<sup>-</sup> – продуктов ассимиляции растений (Осмоловская, 1988, 1992).

Преимущество смешанной формы азотного питания перед чисто аммонийной наблюдается только на растворах с рН 4,0–5,8. При увеличении рН среды до 8,2 суммарное поглощение азота из обоих растворов выравнивается.

Оптимизация ионного баланса растений на аммонийном азоте при нейтрализации среды обусловлена изменением направленности и величины градиента рН на мембранах поглощающих клеток корней, что способствует поддержанию ионного равновесия и рН-гомеостаза растений.

Бобовые чувствительны к ионам не только водорода, но и алюминия. Ионы алюминия, формируя обменную кислотность дерново-подзолистых почв и почв северной части черноземной зоны, воздействуют на обмен веществ растений и их продуктивность (Климашевский, 1991) (табл. 3.1.3.3).

Основным фактором, ограничивающим выращивание клевера в Нечерноземной зоне, является повышенная кислотность почв. При рН 4,5–5,0 тормозится его рост, слабо образуются клубеньки, снижается азотфиксация (Авдонин, 1975; Вавилов, Посыпанов, 1983). Однако клевер сорта ВИК-7 обладает высокой симбиотической азотфиксацией в условиях дерново-подзолистой суглинистой почвы с повышенной кислотностью и низкой обеспеченностью фосфатами (Трепачев, 1999). Объясняется это природой почвенной кислотности, обусловленной не столько концентрацией ионов Н<sup>+</sup>, сколько ионами алюминия и малой степенью его подвижности.

При этом важную роль играет биологический фактор: высокая устойчивость микро- и макросимбионтов к уровню ионной токсичности ионов водорода и алюминия.

Таблица 3.1.3.3 –Характер действия ионов алюминия на различные сорта гороха

Чувствительный сорт	Устойчивый сорт
1	2
Чувствительный сорт сои синтезирует меньше органического вещества на единицу элементов питания ( $^{15}\text{N}$ , $^{32}\text{P}$ , $^{40}\text{K}$ )	Устойчивый (толерантный) сорт сои синтезирует большее количество органического вещества на единицу элементов питания
Алюминий подавляет поглощение $^{32}\text{P}$ корнями гороха, причем взаимодействует с фосфатами не только на поверхности клеток корня, но и с фосфорсодержащими белками протоплазмы внутри их	Устойчивые сорта бобовых способны изолировать алюминий от чувствительных метаболических участков, в первую очередь корней
У чувствительного сорта гороха (Тулунский зеленый) в зоне корневых волосков фиксируется в три раза больше фосфатов	У устойчивого генотипа гороха в эпидермисе корня локализовано 66% алюминия, у чувствительного – 82%
Накопление $\text{P}_2\text{O}_5$ в митохондриях и ядрах клеток корня гороха выше в 4,2 и в 1,7 раза соответственно	У устойчивых форм осаждение алюминия на поверхности корня идет быстрее, корневые волоски играют роль активного ионообменника
Алюминий сильнее подавляет $^{14}\text{C}$ синтез пектина, гемиделлюлозы и целлюлозы клеточных стенок корней гороха	Алюминий слабее действует на активность ферментов синтеза (гидролаз), связывая и инактивируя ионы алюминия
Существенно снижается проницаемость воды клеточных стенок в зоне растяжения и в зоне деления клеток	Устойчивый к алюминию сорт гороха накапливает 84% сухого вещества, тогда как чувствительный – 35% к контролю
Количество SH-групп снижается в 2–3 раза	Количество SH-групп остается на уровне контроля
Подавляет накопление яблочной и лимонной кислот	Повышенное содержание органических кислот
Увеличивается содержание АБК в 4,7 раза по сравнению с устойчивыми сортами	Понижается содержание АБК по сравнению с контролем
Повышается накопление свободных нуклеотидов в клетках корня	Не влияет на содержание АТФ в клетках корня
Существенно ингибируется окислительная и фосфатазная активность тканей корня, алюминий разобщает окисление и фосфорилирование	Поглощают больше $\text{NO}_3^-$ ; большее количество $^{15}\text{N}$ включается в аминную и амидную фракции
Алюминий подавляет активность НР-азы корней гороха на 73%	Алюминий подавляет активность НР-азы корней гороха на 50%
Подавление активности глутаминсинтетазы аналогичен подавлению активности НР-азы	Нециклическое фотофосфорилирование в 3,5 раза, а циклическое – в 2,2 раза протекает быстрее, чем у чувствительной формы
Активность АТФ-азы хлоропластов снижается на 34%, а активность кислой фосфатазы увеличивается в 3 раза	Активность реакций нециклического фотофосфорилирования в хлоропластах снижается незначительно, а циклического – повышается
	Более высокая экскреторная функция (по $^{32}\text{P}$ ) корней гороха

Действие кислотности имеет еще одну особенность: чем выше кислотность почв, тем труднее усваивается почвенный магний. При повышении содержания магния растет урожай надземной массы и зерна люпина (Трепачев, 1999). При недостатке магния он передвигается из вегетативных в репродуктивные органы, при этом сходит на нет фотосинтетическая актив-

ность, листья желтеют и опадают. Резко снижается транспорт сахаров в корни и к клубенькам; в результате фиксация азота прекращается.

Для бобовых растений важны не только соотношения Са:К, Mg:К, но и Са:Mg. На почве с повышенным содержанием подвижного калия и пониженным количеством подвижных фосфатов на фонах без удобрений и РК у растений в период репродуктивной фазы осыпались листья. Фосфорные и калийные удобрения (внесенные совместно) снижали урожай люпина и кормовых бобов (табл. 3.1.3.4).

Таблица 3.1.3.4 – Влияние кальция и магния на накопление надземной массы, корней и клубеньков бобовыми растениями, г/сосуд (Трепачев, 1999)

Вариант	Люпин			Кормовые бобы		
	надземная масса	корни	клубеньки	надземная масса	корни	клубеньки
Без удобрений	91,6	38,4	1,7	16,4	23,0	0,05
РК-фон	73,9	38,8	1,8	11,0	13,8	-
Фон+Mg	136,9	35,2	3,1	44,8	25,8	1,51
Фон+Са	117,2	49,5	2,3	21,0	14,2	0,30
Фон+Са,Mg	145,1	31,8	2,4	62,3	27,7	1,72

Магний на фоне РК существенно (в 1,8 раза у люпина и в 4 раза у бобов) повышал урожай надземной массы и развитие клубеньков. Совместное внесение кальция и магния повышало урожай надземной массы у бобовых растений снижало формирование клубеньков у люпина и повышало – у бобов. Столь разная (неоднозначная) реакция растений на условия питания связана с тем, что бобы (а также фасоль и клевер) относятся к группе кальцефилов, тогда как люпин – к кальцефобам.

На черноземе выщелоченном при кислотном значении pH (5,1–5,4) снижалась активность фотосинтетического аппарата вики, что приводило к уменьшению урожая зерна (табл. 3.1.3.5). На известкованной почве эффективность удобрений достигала 8–8,9%, тогда как на произвесткованной – 9–11,5% по отношению к контролю. При внесении извести урожай вики повышался на 2,2–2,8 ц/га (10–12%).

Таблица 3.1.3.5 – Влияние известкования и внесения минеральных удобрений на урожай зерна вики яровой (Двойникова, 2014)

Вариант	Неизвесткованная почва			Известкованная почва				
	урожай зерна, ц/га	прибавка		урожай зерна, ц/га	прибавка		прибавка от извести	
		ц/га	%		ц/га	%	ц/га	%
Без удобрений	21,2	-	-	23,4	-	-	2,2	10,4
P <sub>45</sub> K <sub>45</sub>	22,9	1,7	8,0	25,5	2,1	9,0	2,6	11,4
N <sub>20</sub> P <sub>45</sub> K <sub>45</sub>	23,3	2,1	9,9	26,1	2,7	11,5	2,8	12,0
HCP <sub>0,5</sub>	1,2			1,3				

Серые лесные почвы характеризуются низким содержанием гумуса (3–4%) и значением pH (3,8–4,5), что негативно влияет на развитие и активность бактерий рода *Rhizobium leguminosarum*, снижает урожай гороха (табл. 3.1.3.6).

Таблица 3.1.3.6 – Формирование симбиотической системы и урожай зерна гороха в зависимости от доз дефеката (Ступина, 2010)

Дозы дефеката, т/га	pH <sub>сол</sub>	ОСП*	АСП*	Урожай зерна, ц/га
Контроль	4,8	76,5	0,37	10,5
Дефека-6	5,8	130,7	17,6	11,6
Дефека-12	5,8	143,9	20,2	14,7
Дефека-24	6,6	157,2	22,6	17,9

\*ОСП – общий симбиотический потенциал; АСП активный симбиотический потенциал

Кальций, содержащий дефека-т (отход свеклосахарного производства), регулирует pH<sub>сол</sub> почвенного раствора (Шишкин, 2002). Дефека-т в дозе 24 т/га обеспечивал наибольшую активность симбиотического потенциала бобово-ризобияльной системы, способствовал лучшему развитию ассимиляционной поверхности листового аппарата, что в результате привело к формированию высокого урожая зерна гороха (Ступина, 2010). Минеральные удобрения (N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>) подавляли развитие активных клубеньков по сравнению с дефека-том из-за снижения величины pH.

В условиях Северного Зауралья бобовые растения иногда не вступают в симбиоз с ризобиями, страдают от недостатка азота и формируют низкие урожаи. Одним из лимитирующих факторов является кислая реакция серой лесной почвы (pH<sub>сол</sub> 4,6–5,4). Снижение кислотности с 4,6 до 5,5 увеличивало содержание леггемоглобина (Лб) в клубеньках в 1,5–2 раза; количество фиксированного азота воздуха вики возросло на 130 мг, горохом – на 330 мг/сосуд (табл.3.1.3.7).

Таблица 3.1.3.7 – Показатели симбиотической и фотосинтетической деятельности растения вики и гороха в зависимости от pH почвы. (Петухов, 1995)

Показатель	Вика			Горох		
	4,6	5,5	6,2	4,6	5,5	6,2
Масса активных клубеньков, г/сосуд	1,2	1,6	2,1	1,1	1,8	3,0
Содержание леггемоглобина, мг/г сырых клубеньков	5,4	7,9	8,2	3,9	7,8	8,4
N в растениях, г/сосуд	1,03	1,16	1,55	0,92	1,25	1,82
Увеличение N <sub>фикс</sub> , мг/сосуд	-	130	520	-	330	900
Площадь листьев, дм.кв./сосуд	18,0	20	25	13	18	23
Абс. сух. в-во, г/сосуд	34,0	39,5	51,8	32,2	38,8	55,1
Масса семян, г/сосуд	7,5	9,0	14,3	10,0	13,3	19,9

Дальнейшее снижение кислотности почвы до pH 6,2 повышало массу клубеньков вики на 31%, гороха – на 67%; содержание леггемоглобина – на 4 и 8% соответственно; количество фиксированного атмосферного азота воздуха возросло в 2,8–4раза, а урожай семян – на 50–59%. При подкислении дерново-подзолистой почвы до pH 5,5 масса корней люцерны снижается в 3 раза, а поступление азота в почву – в 5 раз, что обедняет ее вследствие подавления активности нитрогеназы в 2,5–2,8 раза.

### 3.1.4 Отношение бобовых растений к засолению почвы

Различные виды и сорта бобовых растений проявляют неодинаковую устойчивость к засолению почвы. Уровень солеустойчивости зависит от биологических особенностей растений и почвенно-климатических условий их возделывания. Решение практических задач повышения солеустойчивости бобовых растений тесно связано с пониманием механизмов адаптации и метаболизма веществ в конкретных условиях солевого стресса (Удовенко, 1995; Медведев, 2004; Кошкин, 2010).

По устойчивости к засолению злаковые и бобовые растения располагаются в следующий ряд по убыванию (Удовенко, 1995):

Житняк > волоснец > костер > пырей > кохия > ячмень > пшеница > рис > овес > сорго > просо > донник > кукуруза > нут > чина > люпин > бобы > чечевица > фасоль > вика > горох > вигна > соя.

В этой схеме отсутствует ряд солеустойчивых сельскохозяйственных культур (люцерна, сахарная свекла, бахчевые, хлопчатник), что снижает ценность ее репрезентативности.

Более высокая солеустойчивость злаковых культур по сравнению с бобовыми связана с центрами их происхождения: Так, пшеница, ячмень, овес родом из аридных районов Северной Африки и Юго-Восточной Азии, отличающихся значительным распространением засоленных почв. Бобовые растения – из районов с достаточным увлажнением и меньшим распространением засоленных земель. Поэтому среди бобовых растений нет ни одного вида типичных галофитов (рис. 3.1.4.1.). Высокой солеустойчивостью среди сортов бобов и фасоли отличались те, которые происходят из западноазиатских регионов. Скороспелые сорта отличаются более высокой солеустойчивостью по сравнению с позднеспелыми. Так, солеустойчивость бобов закавказской группы связана с тем, что они являются как раз скороспелыми.

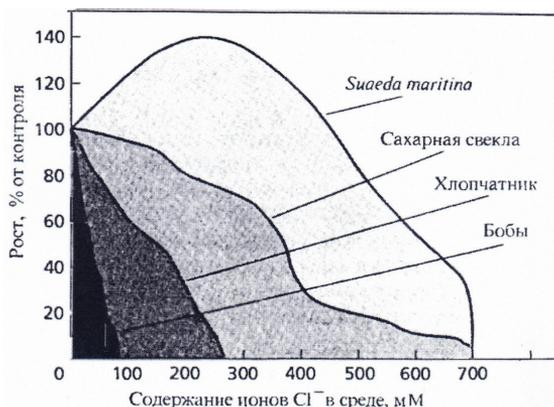


Рисунок 3.1.4.1. Зависимость роста различных видов растений от концентрации хлорида в среде (Кошкин, 2010).

Основной путь поступления солей в растения – пассивное поглощение корнями в связи с транспирационным током. Наиболее солеустойчивые виды растения отличаются менее интенсивным поглощением солей. Более солеустойчивый ячмень поглощал в 6 раз меньше  $^{36}\text{Cl}$  по сравнению с менее устойчивыми бобами (Удовенко, 1977). Накопление солей (после поглощения) носит характер затухающей со временем кривой. Как правило, накопление солей в органах растений коррелирует с содержанием их в среде. Поступающие ионы в клетке распределяются неравномерно (табл. 3.1.4.1).

Таблица 3.1.4.1– Распределение  $^{36}\text{Cl}$  в клетках листьев бобовых растений (Удовенко, 1977)

Растение	Органоиды клетки	Содержание $^{36}\text{Cl}$ , % от общего количества	Масса органоида, %
Бобы	вакуоль	32	52
	цитоплазма	52	24
	остаток	16	24
Фасоль	вакуоль	34	55
	цитоплазма	51	30
	остаток	15	15

Значительное количество  $^{36}\text{Cl}$  содержится и накапливается в цитоплазме бобовых растений. Одной из причин негативного действия засоления являются подавление общего уровня метаболизма и, как следствие, торможение поглощения элементов питания. Так, при засолении резко снижается содержание калия в корнях бобов, хотя в надземных органах его количество меняется незначительно. При засолении меняется состояние воды в клетке: существенно возрастает доля прочно связанной; повышается содержание осмотически активных веществ и гидрофильных коллоидов; во всех органах растений растет осмотический потенциал клеточного сока. Это защитная реакция растений на затрудненное снабжение водой в условиях засоленного субстрата (Удовенко, 1977). В процессе засоления существенно снижается продуктивность фотосинтеза (табл. 3.1.4.2). У менее устойчивых растений подавление процесса фотосинтеза идет сильнее, чем у более устойчивых.

Таблица 3.1.4.2 –Продуктивность фотосинтеза у бобов при засолении (Удовенко, 1977)

Вариант	Продуктивность фотосинтеза, мг/дм <sup>2</sup> ·сут			
	1–3 недели	3–5 недель	5–7 недель	за всю вегетацию
Контроль	118	38	60	63
NaCl:2,5 ат	100	32	38	43
5,0 ат	104	22	33	37
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :2,5 ат	113	49	36	49
5,0 ат	105	37	39	42

При засолении в продуктах фотосинтеза у фасоли возрастала доля аминокислот и снижалась доля органических кислот и сахаров (табл. 3.1.4.3). Таблица 3.1.4.3 – Распределение метки  $^{14}\text{C}$  в продуктах фотосинтеза листьев фасоли (Удовенко, 1977)

Вариант	Радиоактивность фракций, % от общей активности $^{14}\text{C}$ в листьях			
	аминокислоты	белки	сахара	крахмал
Контроль	11,0	18,8	16,6	6,0
NaCl: 2,8 ат	13,9	13,0	15,8	5,0

При этом тормозится синтез белков и крахмала, а также замедляется транспорт продуктов фотосинтеза из листьев в корни, что, в свою очередь, влияет на фотосинтетическую активность растений.

При усилении засоления почвы значительное количество  $^{36}\text{Cl}$  накапливается в корешках и ростках фасоли. Это тормозит синтез белков в клетке, вследствие чего подавляются обе фазы (деления, растяжения) ростовых прогрессов клеток корня (Удовенко, 1977).

При засолении интенсивность поглощения минерального азота бобовыми снижается. Однако содержание общего азота в различных органах практически не меняется. Но при засолении тормозится редукция нитратов, что приводит к их удержанию в клетках корней. Причиной накопления  $\text{NO}_3^-$  в растениях при засолении является, по-видимому, подавление активности нитратредуктазы. При выращивании растений в условиях засоления загрузка  $\text{NO}_3^-$  в ксилему снижается пропорционально уровню солевого стресса. Засоление существенно увеличивает соотношение амиды/нитраты в ксилеме, что сопровождается ускоренной трапелокацией ассимилятов из листьев в плоды (семена).

Кроме того, при засолении окислительно-восстановительная способность смещается в сторону окисления. Снижение синтеза белков при засолении связано с целым комплексом факторов: падением энергообеспеченности, уменьшением количества активированных аминокислот и подавлением функциональной активности нуклеиновых кислот. Кроме того, у менее солеустойчивых растений (горох, бобы) существенно повышается доля щелочерастворимых белков в клетках корня.

При засолении меняется активность нуклеиновых кислот – вследствие стабилизации ДНК белками она снижается. При засолении усиливается прочность связи гистонов с ядерной ДНК и растет количество гистонов в клетке, что повышает структурную устойчивость ДНК и одновременно снижает ее функциональную активность как регулятора метаболизма (Удовенко, 1977, 1979). Также снижается интенсивность включения  $^{32}\text{P}$  во фракцию нуклеиновых кислот (табл. 3.1.4.4).

При засолении включение  $^{32}\text{P}$  в нуклеиновые кислоты бобов снижалось в 2,1–2,4 раза, а в нуклеиновые кислоты пшеницы – несколько меньше (в 1,3–1,7 раза). Активность процесса в корнях бобов подавлялась засолением сильнее, чем в листьях, тогда как у пшеницы – наоборот (Удовенко, Чудинова, 1986).

Таблица 3.1.4.4 – Влияние засоления на включение  $^{32}\text{P}$  в нуклеиновые кислоты бобов и пшеницы (Удовенко, 1977)

Растение, сорт	$^{32}\text{P}$ фракции нуклеиновых кислот, % от общего количества $^{32}\text{P}$			
	листья		корни	
	контроль	NaCl	контроль	NaCl
Бобы, Русские черные	1,9	0,9	2,7	1,1
Пшеница, Саратовская 29	2,5	1,5	3,3	2,5

На формировании симбиотического аппарата негативно сказывается повышенная концентрация солей в почве. Наиболее токсичным для ризобий является сульфатно-содовое засоление. Бобовые растения отличаются разной солеустойчивостью. К неустойчивым к засолению относятся: фасоль и клевер; к среднеустойчивым: соя, конские бобы, горох, донник, люцерна, лядвенец большой; к устойчивым – лядвенец рогатый. На солонцах солеустойчивость бобовых растений оценивают по устойчивости к обменно натрию. К неустойчивым относится фасоль, к среднеустойчивым – вика и клевер, к устойчивым – люцерна и донник.

Различают также солеустойчивость и на генотипическом уровне. Так, более устойчивый сорт фасоли удерживал большее количество ионов натрия в корнях, что обусловило более низкий уровень его аккумуляции в листьях (Шевянова, Королевски, 1994). У устойчивого сорта проявление деградиационных процессов (снижение содержания связанного пролина и, как следствие, аккумуляция свободного пролина) отмечается при более высоких концентрациях солей, чем у чувствительного к засолению сорта. У обоих сортов фасоли функционируют качественно одинаковые механизмы ответных реакций. Однако у более чувствительного к засолению сорта ответные реакции, ведущие к неблагоприятным физиологическим изменениям, включаются быстрее и более резко выражены.

Использование сильнозасоленных почв становится возможным после проведения комплекса мелиоративных мероприятий – физических, химических, агротехнических, биологических. Универсальным приемом удаления солей является промывка, после которой вносят минеральные и органические удобрения и вводят специальные переходные севообороты. В этих севооборотах применяют относительно солеустойчивые виды растений: люцерну, джугару, ячмень, просо, сорго, чумизу, подсолнечник, сахарную свеклу.

Одной из лучших культур-освоителей считается люцерна. Она потребляет значительно количество воды, иссушая верхние слои почвы. Благодаря мощной корневой системе использует воду из нижних горизонтов почвы. Густой травостой люцерны сокращает испарение воды с поверхности почвы, снижая ее капиллярное поднятие с растворенными солями. Корни растений люцерны усваивают труднорастворимые фосфаты, а растительные остатки содержат значительное количество симбиотического азота. Разлагаясь, корни люцерны формируют структурную почву.

## 3.2 Антропогенные факторы

### 3.2.1 Азот в питании бобовых растений

Особенность бобовых в том, что, являясь элементами природного реактора, они аккумулируют азот атмосферы и в то же время испытывают негативное действие на себе повышенных доз минерального (технического) азота. Кроме того, у них отмечается смена значимости симбиотрофного и автотрофного способов усвоения азота в ходе их развития. Это важно, поскольку от данного соотношения зависят избирательное проникновение бактерий в ткани и формирование симбиотического аппарата.

Клубеньковым бактериям необходим азот в связанных формах, и без их присутствия в питательной среде они не развиваются. Кроме того, клубеньковые бактерии могут выдерживать высокие концентрации минерального азота, которые губительны для самих растений (Гукова, 1971, 1974; Шильникова, 1972). Выращивание в чистой культуре длительное время при высоких концентрациях азота не снижает вирулентности и симбиотической активности клубеньковых бактерий.

Для формирования 1 т урожая зерна бобовые растения расходуют 50–82 кг N/т, а урожая соломы – 11–28 кг N/т (табл. 3.2.1.1). Максимальное количество азота для получения 1 т зерна тратит соя (82 кг), а 1 т сена – сераделла (28 кг).

Таблица 3.2.1.1 – Содержание азота в бобовых и его расход

Растение	Вид продукции	Азот	
		содержание, %	расход, кг/т
Бобы	зерно	4,1–4,7	59–63
	солома	1,2–2,3	15–21
Вика	зерно	4,0–5,4	61–65
	солома	1,4–1,9	17–21
Горох	зерно	2,6–5,6	51–69
	солома	0,9–1,7	17–20
Клевер	зерно	4,1–4,5	62–65
	солома	1,8–2,4	21–25
Люпин	зерно	4,8–7,7	67–71
	солома	1,0–1,4	24–34
Люцерна	зерно	4,4–4,7	64–69
	солома	2,9–4,3	24–29
Сераделла	зерно	4,3–4,6	66–69
	солома	2,0–2,6	28–31
Соя	зерно	3,2–8,8	52–82
	солома	1,2–1,5	13–20
Фасоль	зерно	3,5–4,8	49–59
	солома	1,1–1,3	11–15
Чечевица	зерно	4,2–4,4	59–63
	солома	1,4–2,0	16–19
Эспарцет	зерно	4,3–4,5	50–53
	солома	2,1–3,2	18–25

В условиях песчаной культуры бобовые растения (горох, вика) на ранних этапах развития (до вступления в симбиоз с клубеньковыми бактериями) в основном используют азот запасных веществ семени и минеральный азот (Гукова, 1971, 1974). При этом запасные вещества усваиваются достаточно медленно и процесс не зависит от наличия азота в питательной среде. По мере развития листового аппарата растение переходит на использование минерального и симбиотического азота. В конце вегетации в урожае бобовых растений соотношение азота удобрения и симбиотического азота приближается к единице. Таким образом, песчаные культуры отличаются рядом признаков: отсутствует минерализация почвенного органического вещества, нет иммобилизации азота, не развита специфическая микрофлора. В почвенных условиях в урожае бобовых культур преобладает симбиотический азот (свыше 60%). Горох на 20-й день вегетации начинает активно использовать азот почвы, удобрения и атмосферы (рис. 3.2.1.1). Наиболее активно растения фиксировали атмосферный азот: его доля в растениях при уборке урожая составила 70%, тогда как доля азота почвы и азота удобрений не превышала 30% (Jensen, 1987). При внесении азотных удобрений (25–50 кг N/т) горох фиксировал 213–244 кг/га симбиотического азота.

Клевер наиболее интенсивно фиксировал азот в период с 17.VI по 21.VII при его выращивании на дерново-подзолистой почве (табл. 3.2.1.2). В этот же период растения активно использовали азот почвы и азот удобрения. Азотные удобрения (30 кг N/га), внесенные локально, стимулировали потребление клевером азота почвы в 1,2 раза, азота удобрения – в 1,2 раза и азота атмосферы – в 1,5 раза. При уборке клевера соотношение азота удобрения и симбиотического азота составило 1:8–10.

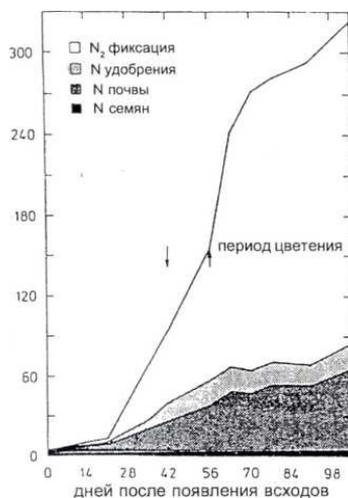


Рисунок 3.2.1.1. Накопление азота биомассой гороха из различных источников при внесении N 25 кг/га (Jensen, 1987)

В условиях вегетационного опыта (песчаная культура) при использовании кальциевой селитры (меченной <sup>15</sup>N) соя в начале цветения фиксировала

2,89 мг N<sub>2</sub>/г клубеньков в сутки (Троицкая, Северова, 1985). В период бо-бообразования активность клубеньков несколько снижалась, но оставалась на высоком уровне. Доля симбиотического азота в биомассе сои в начале цветения достигала 74,7%, в период массового цветения – 88,4%, в середине плодообразования – 92,1% от общего количества азота в растениях. Доля симбиотического азота в зерне составила 98,9%.

Таблица 3.2.1.2 – Динамика потребления азота удобрения, азота почвы и атмосферного азота клевером луговым 1 года пользования, г/м<sup>2</sup>

Способ внесения азотных удобрений	Даты			
	15.V	17.VI	21.VII	13.VIII
<i>Азот удобрения</i>				
<sup>15</sup> N <sub>30</sub> , разброс	0,14	0,22	0,50	0,72
<sup>15</sup> N <sub>30</sub> , локально	0,29	0,50	0,65	0,84
<i>Азот почвы</i>				
<sup>15</sup> N <sub>30</sub> , разброс	0,56	0,84	1,97	2,81
<sup>15</sup> N <sub>30</sub> , локально	0,65	1,14	2,60	3,25
<i>Азот атмосферы</i>				
<sup>15</sup> N <sub>30</sub> , разброс	1,18	1,77	4,14	5,91
<sup>15</sup> N <sub>30</sub> , локально	1,77	3,11	7,10	8,87

Зернобобовые культуры (горох и бобы) лучше использовали азот из нитратной формы удобрения, тогда как люпин – одинаковое количество азота из обеих форм (табл. 3.2.1.3).

Таблица 3.2.1.3 – Использование зернобобовыми культурами азота различных форм удобрений (Трепачев, 1999)

Вид	Доза азота, кг/га	<sup>15</sup> NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		Ca( <sup>15</sup> NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	
		кг/га	% от внесенного	кг/га	% от внесенного
Люпин	20	8,7	43,6	8,6	43,0
	60	27,1	45,1	29,2	48,7
Горох	20	10,8	54,0	11,7	58,3
	60	29,8	49,6	37,2	62,0
Бобы	20	10,8	53,8	11,7	58,5
	60	32,2	53,6	36,3	60,2

Люпин использовал наименьшее количество азота из обеих форм азотных удобрений, тогда как горох – из нитратной формы, а бобы – из аммонийной. С повышением дозы азотных удобрений степень усвоения азота удобрениями всеми культурами увеличивалась (Трепачев, 1999). Уровень чувствительности нитрогеназного комплекса к содержанию минерального азота в почве зависит от вида бобового растения (Верниченко, 2017; Окорков и др., 2007).

Азотфиксация вики в чистых посевах в начальный период развития (24–26 дня) под действием азотных удобрений (60 кг N/га) снижалась на 40% (Трепачев, 1999). Подавление азотфиксации у 37–40-дневных растений от азотных удобрений значительно ослабевало, а у 55-дневных отсутствовало полностью.

Наибольшее количество азота удобрения (53–55%) бобы использовали при выращивании на дерново-подзолистой почве (Московская обл.): вика –

40–49%, горох – 50–62%, клевер – 47–57%, люцерна – 45–53%, люпин – 43–49%, соя – 58–61% от применяемой дозы (табл. 3.2.1.4, 3.2.1.5). От 30 до 40% азота удобрения использовали вика, клевер, люцерна, сераделла, фасоль; от 40 до 50% – люпин и соя; свыше 50% – бобы и горох (Кореньков, 1999; Трепачев, 1999). По ранее обобщенным данным, бобы кормовые использовали 53–57% азота удобрения, клевер – 42–46%, люпин – 43–49%, то есть значения близки к выше приведенным (Завалин, Соколов, 2016). По неопубликованным данным Н.Я. Шмыревой, клевер на водоразделе дерново-подзолистой почвы (Смоленская обл.) в смеси с тимофеевкой использовал 3,2–6,0% азота сульфата аммония и 2,6–10,6% в нижней части склона, тогда как тимофеевка луговая – 16,0–38,6 и 16,6–26,0% соответственно.

В условиях дерново-среднеподзолистой супесчаной почвы (Тверская обл.) клевер в смешанном посеве использовал 1,6% азота мочевины, тогда как тимофеевка – 29,7% от применяемой дозы (Афанасьев, Дворецкий, 1998). В чистом одновидовом посеве тимофеевка усваивает 52–66% азота удобрения (Трепачев, 1973; Ефимов и др., 1983).

Таблица 3.2.1.4 – Использование азота удобрения бобовыми культурами в различных регионах России, % от применяемой дозы азота

Почва, регион	Культура	Форма и дозы азотного удобрения	Коэффициент использования N-удобрения растениями, %	Источник
Серая лесная, Московская обл.	Бобы кормовые	$N_{aa}^*$ 30–300 мг/кг	35–75	Верниченко, 2017
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_a^*$ 30	43	Трепачев, 1999
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_a^*$ , $N_{ски}$ , 20, 60	53–55	Трепачев, 1999
Дерново-подзолистая, Московская обл.	Вика	$N_{aa}^*$ 30	4–9	Филимонов, Стрельникова, 1988
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_a^*$ 30	40–49	Кореньков, 1999
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_a^*$ 60	47	Ягодина, Вревкин, 1988
Дерново-подзолистая, Московская обл.	Горох	$N_a^*$ 60	45	Ягодина, Вревкин, 1988
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_a^*$ 30	40–43	Трепачев, 1999
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_a^*$ , $N_{ски}$ 20, 60	50–62	Трепачев, 1999
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_a^*$ 75–500 мг N/сосуд	47–58	Трепачев, 1999
Серая лесная, Московская обл.	Горох	$N_{aa}^*$ 30	44–59	Соколов, Семенов, 1992
Серая лесная, Московская обл.		$N_{aa}^*$ 30–300 мг/кг	37–59	Верниченко, 2017
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_{aa}^*$ , корневая подкормка	27–57	Верниченко, 2017
Чернозем оподзоленный, Киевская обл.		$N_a^*$ 30	41–51	Пироженко и др., 1988
Чернозем оподзоленный, Киевская обл.		$N_{aa}^*$ 30	30–35	Пироженко и др., 1988

Окончание табл. 3.2.1.4

Почва, регион	Культура	Форма и дозы азотного удобрения	Коэффициент использования N-удобрения растениями, %	Источник
Дерново-подзолистая супесчаная, Московская обл.	Клевер	$N_{aa}$ , 529 мг/м <sup>2</sup>	42–43	Трепачев, 1999
Дерново-подзолистая, Смоленская обл.		$N_a$ , 60	21–39	Явтушенко и др., 2005
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_a$ , 75 и 225 мгN/сосуд	47–57	Трепачев, 1999
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_a$ , 529 мг/м <sup>2</sup>	43–46	Трепачев, 1999
Подзолистые суглинистые, Республика Коми		$N_{aa}$ , 30	18–26	Безносиков, 1997
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_{aa}$ , 60,120	28–46	Трепачев, 1973
Чернозем оподзоленный, Киевская обл.	Люцерна	$N_{aa}$ , 30	12–16	Пироженко и др., 1988
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_a$ , 30,60	45–53	Трепачев, 1999
Чернозем типичный, Белгородская обл.		$N_{aa}$ , 30	37–45	Азаров, 1995
Дерново-подзолистая, Московская обл.	Люпин	$N_{aa}$ , $N_{ски}$ , 30,60	43–49	Трепачев, 1973
Чернозем оподзоленный, Киевская обл.		$N_a$ , 30	34–40	Пироженко и др., 1988
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_a$ , 30	49	Трепачев, 1999
Дерново-подзолистая супесчаная, Брянская обл.	Сераделла	$N_a$ , 30	37–41	Мишустин, 1972
Дерново-подзолистая песчаная, Владимирская обл.		$N_{aa}$ , 30	35–40	Трепачев, 1999
Кварцевый песок, Московская обл.	Соя	$N_{ски}$ , 16,8 мг/кг	32	Троицкая, Северова, 1988
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_a$ , 0,3 г/сосуд	50–55	Трепачев, 1999
Дерново-подзолистая, Московская обл.		$N_{ски}$ , 0,3 г/сосуд	58–61	Трепачев, 1999
Песчаная культура, Московская обл.	Фасоль	$N_{aa}$ , 120-720 мг N/сосуд	12–65	Гукова, 1974

Таблица 3.2.1.5 – Использование азота удобрения бобовыми культурами в различных регионах России, % от применяемой дозы

Культура	Коэффициент использования азота удобрения
Бобы	44–58
Вика	30–35
Горох	45–59
Клевер луговой	33–43
Люцерна	31–38
Люпин	42–46

Культура	Коэффициент использования азота удобрения
Сераделла	36–40
Соя	47–49
Фасоль*	12–65
Среднее	36–48
В среднем по бобовым	42

\* Песчаная культура

В зависимости от почвенно-климатических условий бобовые растения способны использовать от 12 до 65% азота удобрения (среднее значение – 36–48%), а злаковые культуры – 29–52% (среднее значение – 33–48%) (Азаров, 2003; Кореньков, 1999; Трепачев, 1999; Верниченко, 2017).

Таблица 3.2.1.6 – Баланс азота минеральных удобрений (меченных <sup>15</sup>N) при выращивании бобовых и злаковых растений

Растения	Азот удобрения, % от внесенного		
	использовано растениями	иммобилизация	газообразные потери
Бобовые	36–48	23–34	23–28
Злаковые	33–48	11–59	23–39

При выращивании бобовых растений в почве закрепляется и теряется азота удобрения меньше по сравнению со злаковыми культурами (табл. 3.2.1.6): в первом случае – до 34%, в то время как во втором – до 59%. В посевах бобовых растений теряется до 28% азота удобрения, а при выращивании злаковых – до 39% от применяемой дозы. Поэтому при возделывании бобовых в круговороте азота участвует значительно меньшее количество азота удобрения по сравнению с зерновыми.

Последующие культуры севооборота в течение первых двух лет используют 20–25% азота растительных остатков бобовых культур, в течение 3–4 лет – не более 30–33% – внесенного азота (Захарченко и др. 1979; Леончик, 1979). Ячмень в первый год использовал 12% азота надземной массы клевера; 67% его закреплялось в почве, и 21% терялся, тогда как при внесении сульфата аммония – 36, 21 и 43% от применяемой дозы соответственно. При внесении растительных остатков бобовых культур последующие растения дополнительно потребляют азот почвы (Серегин, 2000).

Таблица 3.2.1.7 – Баланс азота почвы за период вегетации ячменя, мг/сосуд (Серегин, 2000)

Вариант	Использовано растениями	Закрепилось в почве	Газообразные потери
РК-фон	82	132	50
Фон + надземная масса клевера	125	202	77
Фон + Na	177	285	108

При внесении надземной массы клевера (меченной <sup>15</sup>N) ячмень усиливал использование азота почвы в 1,5 раза, тогда как при внесении сульфата аммония – в 2,2 раза (табл. 3.2.1.7). Сульфат аммония усиливал минерали-

зацию почвенного азота и его потребление ячменем в 1,4 раза лучше, чем биомасса клевера.

Влияние аммония и нитрата на бобово-ризобиальный симбиоз определяется концентрацией этих соединений (Верниченко, Миллер, 1985; Верниченко, 2017). Невысокие концентрации аммония и особенно нитрата стимулировали развитие растений и нитрогеназную активность эффективного симбиоза люцерны с *Rhizobium meliloti*. В пахотных и целинных почвах азотфиксирующие микроорганизмы связывают 20–30 кг N/га за год. Фиксированный микроорганизмами азот ( $^{15}\text{N}$ ) поровну распределялся между устойчивыми и лабильными соединениями почвенного азота (Калининская, Миллер, 1985). В трудногидрализуемых фракциях почвенного азота закрепляется 52–56% биологического азота. За 60 дней яровая пшеница и овес использовали 12%, кукуруза – 10%, рис – 30% содержащегося в почве биологического азота. Его потери за 2–3 года составили 20–30%.

Инокуляция риса *Flavobacterium* и *Azospirillum* повышало азотфиксацию в системе почва – растение (Сирота, 1985). Механизм действия инокуляции связывают с выделением диазотрофами гормонов или индуцированием их образования растениями и вследствие гормонального действия усилением поглотительной деятельности корней. Известно, что некоторые фитогормоны (АБК, ауксины), активизируя протонную помпу клетки, способствуют выделению  $\text{H}^+$  через плазмалемму, обеспечивая поступление ионов в клетку против градиента концентрации.

Поступление атмосферного азота в растения (овес, райграсс) достигало 23% от общего выноса азота (исследования с  $^{15}\text{N}$ ) (Умаров, 1986). По мере повышения дозы азотного удобрения уровень ассоциативной азотфиксации снижался. «...Для несимбиотических азотфиксаторов характерна та же реакция на внешние факторы, в частности на применение минеральных удобрений, как и симбиотических азотфиксаторов. Явная негативная реакция выявлена на повышение дозы азота» (Трепачев, 1999).

За счет ассоциативной азотфиксации доля атмосферного азота в биомассе овса и райграсса составляла 20% от общего потребления азота растениями (Умаров, Смолин, 1985). При внесении азотных удобрений в дозах, не превышающих физиологическую потребность растений в азоте, усвоение атмосферного азота повышалось. При применении высоких доз азотных удобрений активность его фиксации падала.

При внесении соломы ячменя в дерново-подзолистую почву (вегетационный опыт, Московская обл.) в 2,9 раза снижалось использование азота кальциевой селитры люпином, что связано с усилением иммобилизации азота удобрения (табл. 3.2.1.8). При этом потери азота удобрения снижались на 12,8% (Верниченко, 1988). На второй год солома (впоследствии) не оказывала влияния на использование люпином азота вновь внесенной селитры, хотя иммобилизация оказалась выше в 1,3 раза, а потери ниже в 2 раза. В целом за три года солома снижала использование удобрения растениями и его потери и повышала иммобилизацию азота в почве. Наиболее эффективно солома снижала потери азота удобрения на второй год после внесения, то есть впоследствии. К тому же солома увеличивала размеры симбиотической фиксации азота атмосферы люпином. Таким образом, изменения режима

азотного питания люпина связаны с воздействием соломы на микробиологические процессы в почве.

Таблица 3.2.1.8 – Влияние соломы на баланс азота кальциевой селитры (меченной  $^{15}\text{N}$ ) при выращивании люпина (Верниченко, 1988)

Вариант	Первый год			Второй год			В сумме за три года с учетом последствия		
	использовано растениями	закрепилось в почве	потери	использовано растениями	закрепилось в почве	потери	использовано растениями	закрепилось в почве	потери
$\text{Ca}(^{15}\text{NO}_3)_2$	41,6	29,3	29,1	43,2	31,2	25,6	48,8	23,1	28,1
$\text{Ca}(^{15}\text{NO}_3)_2$ + солома в слое 0–10 см	14,2	60,0	25,8	46,1	40,0	13,9	43,2	34,1	22,7

При внесении в почву соломы ячменя (содержание азота 0,67%) люпин в первый год использовал незначительное количество ее азота (1,7–2,9% от внесенной дозы) (табл. 3.2.1.9). Показатель усвоения азота соломы люпином не зависел от глубины ее заделки. Основное количество азота соломы (88,6–94,41%) закреплялось в почве. Потери азота соломы повышались при внесении кальциевой селитры до 6,5% (Верниченко, 1988). Азотные удобрения также усиливали потребление азота соломы люпином вследствие увеличения скорости разложения соломы микроорганизмами.

На второй год использование азота соломы люпином повышалось до 6–8%, а потери – до 7–9%. Основное количество азота соломы (76–85%) закрепилось в почве. На третий год использование азота соломы люпином и газообразные потери его снижались до 3–4% соответственно.

За три года люпин усваивал одинаковое количество азота соломы (11–13% от дозы), а потери его росли при внесении минеральных удобрений до 19,5%. Повышенное количество (15,3%) азота соломы терялось при ее заделке в слой 10–20 см, что, по-видимому, связано с активностью микроорганизмов.

Таблица 3.2.1.9 – Баланс азота соломы (меченной  $^{15}\text{N}$ ) при выращивании люпина, % от внесенного азота (Верниченко, 1988)

Глубина заделки соломы, см	Внесение азотных удобрений	В год внесения			1-й г. п.			2-й г. п.			За три года		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0–10	-	2,9	92,3	4,8	4,5	82,6	5,2	3,8	75,9	2,9	11,2	75,9	12,9
10–20	-	1,8	92,7	5,5	7,8	78,1	6,8	3,5	71,6	3,0	13,1	71,6	15,3
0–20	-	1,7	94,4	3,9	5,8	84,6	4,0	3,6	78,1	2,9	11,3	78,1	10,6
0–10	$\text{Ca}(^{15}\text{NO}_3)_2$	4,90	88,6	6,5	3,8	75,9	8,9	3,2	68,5	4,2	12,0	68,5	19,5

Примечание: 1 – использовано растениями; 2 – закрепилось в почве; 3 – потери.

В условиях дерново-подзолистых почв при локальном внесении азотных удобрений (30 кг N/га) на фоне  $\text{P}_{60}\text{K}_{60}$  бобово-злаковые травы первого года жизни (клевер, тимофеевка) лучше (в 1,1–1,5 раза) использовали азот удобрения, азот почвы и азот атмосферы по сравнению с разбросным способом применения той же дозы (табл. 3.2.1.10). При этом в почве закрепля-

лось в 1,1–1,5 раза меньше азота, поскольку терялось его в 3–5 раз больше. При внесении возрастающих доз сульфата аммония (меченного  $^{15}\text{N}$ ) люпин использовал большее количество азота удобрения, тогда как потребление симбиотического азота отложилось (табл. 3.2.1.11). Наибольшее количество симбиотического азота люпин накапливал в третий срок внесения, то есть когда сформировался аппарат фиксации (Трепачев, 1999). Коэффициент использования азота сульфата аммония люпином снижался по мере повышения дозы удобрения. Минимальное количество азота удобрения люпин использовал в первый срок внесения в дозе  $\text{N}_{450}$ .

Таблица 3.2.1.10 – Поток азота в системе почва – растение (бобово-злаковые травы первого года жизни) в зависимости от способа внесения азотных удобрений, г/м<sup>2</sup>

Источник азота	Использовано растениями		Закрепилось в почве		Газообразные потери	
	1	2	1	2	1	2
Азот удобрения	0,7	1,4	1,0	1,1	1,2	0,4
Азот почвы	2,8	3,2	4,1	2,8	5,3	1,0
Азот атмосферы	5,9	8,8	9,0	7,8	11,6	2,9

Примечание: 1 – Нразброс; 2–N локально.

Таблица 3.2.1.11 – Потребление азота люпином в зависимости от доз и сроков внесения сульфата аммония (меченного  $^{15}\text{N}$ ), мг/сосуд (Трепачев, 1999)

Вариант	Азот, мг/сосуд		N удобрения, % от внесенного
	общий	удобрения	
Фон	567,9	-	-
<i>при посеве</i>			
Фон + $\text{N}_{50}$	431,1	16,7	33,3
Фон + $\text{N}_{150}$	355,5	38,8	25,6
Фон + $\text{N}_{450}$	263,5	79,9	17,8
<i>через 10 суток</i>			
Фон + $\text{N}_{50}$	428,5	20,7	41,5
Фон + $\text{N}_{150}$	369,9	53,3	35,5
Фон + $\text{N}_{450}$	304,1	140,4	31,3
<i>через 20 суток</i>			
Фон + $\text{N}_{50}$	539,6	17,5	35,0
Фон + $\text{N}_{150}$	470,7	87,3	42,7
Фон + $\text{N}_{450}$	433,7	152,6	33,9

Использование азота удобрения зависит от состава агрофитоценоза. В условиях дерново-среднеподзолистой почвы (Тверская обл.) тимофеевка луговая в чистом посеве использовала 27,8% азота мочевины ( $^{15}\text{N}_{120}$ ) (табл. 3.2.1.12). В то же время бобово-злаковый травостой, несмотря на значительное потребление симбиотического азота (52,9 кг/га), лучше усваивал азот мочевины (31,9% от дозы). Это происходило за счет лучшего использования азота тимофеевкой, поскольку клевер фиксирует незначительное его количество.

Таблица 3.2.1.12 – Использование азота мочевины, меченной  $^{15}\text{N}$ , злаковым и бобово-злаковым травостоем (Афанасьев, Дворецкий, 1998)

Травостой	Доза азота, кг/га	Вынос азота, кг/га	В том числе		КИУА, %
			удобрения	почвы	
Злаковый	120	95,4	33,4	62,1	27,8
Бобово-злаковый	120	153,2	38,3	114,9*	31,9

\* Азот почвы и симбиотический азот

По мере развития бобовых (люпин, горох, бобы) доля минерального азота (почвы, удобрения) снижается, а доля атмосферного – возрастает (табл. 3.2.1.13). К моменту созревания в варианте без применения удобрений растения накапливают 74–84% азота атмосферы. По мере повышения дозы азотных удобрений доля азота атмосферы уменьшается с 84 до 43% (Трепачев, 1999). Снижается также и абсолютная величина фиксации атмосферного азота. У гороха было зафиксировано прекращение фиксации азота.

Таблица 3.2.1.13 – Динамика потребления азота атмосферы люпином (Трепачев, 1999)

Доза азота, г/сосуд	Источники поступления азота в растения	Цветение		Блестящий боб		Созревание	
		мг/сосуд	%	мг/сосуд	%	мг/сосуд	%
Фон	Почва, семена + $\text{N}_{0,3}$	222	21	286	19	271	16
	Атмосфера	817	78	1222	81	1450	84
Фон + $\text{N}_{0,3}$	Почва, семена $\text{N}_{0,3}$	473	51	512	32	500	29
	Атмосфера	462	49	1081	68	1226	71
Фон + $\text{N}_{0,9}$	Почва, семена + $\text{N}_{0,9}$	891	100	1046	68	934	57
	Атмосфера	-	-	485	32	717	43

Таблица 3.2.1.14 – Размеры фиксации атмосферного азота клевером в зависимости от дозы азотного удобрения (Трепачев, 1999)

Вариант	Использовано азота атмосферы	
	г/м <sup>2</sup>	% от общего выноса
<i>Слабоокультуренная почва</i>		
Фон	38,4	72,2
Фон+ $\text{N}_{30}$ , 1-й год жизни	41,0	69,5
Фон+ $\text{N}_{60}$ , 1-й год жизни	30,0	62,2
Фон+ $\text{N}_{30}$ , 2-й год жизни	32,2	60,3
Фон+ $\text{N}_{60}$ , 2-й год жизни	30,3	59,5
<i>Хорошоокультуренная почва</i>		
Фон	42,5	70,8
Фон+ $\text{N}_{30}$ , 1-й год жизни	37,3	68,3
Фон+ $\text{N}_{60}$ , 1-й год жизни	34,3	53,6
Фон+ $\text{N}_{30}$ , 2-й год жизни	31,7	53,1
Фон+ $\text{N}_{60}$ , 2-й год жизни	29,5	54,2

На слабоокультуренной почве при внесении 30 кг N/га азотфиксация у клевера первого года жизни повышалась на 8% по сравнению с фоном, тогда как на хорошоокультуренной – снижалась на 13% (табл. 3.2.1.14). При внесении 60 кг N/га азотфиксация у клевера первого года жизни снижалась на 32%, тогда как у клевера второго года жизни – на 7%. На хорошоокультуренной почве эти процессы выражены слабее (в пределах 7–9%). Повышение плодородия почвы не приводило к существенному снижению азотфиксации у клевера в абсолютных значениях. Однако на хорошоокультуренной почве доза азота 60 кг/га в большей мере снижает урожай сена клевера.

До настоящего времени дискуссионным остается вопрос об эффективности малых (стартовых) доз азота для повышения его биологической фиксации бобовыми культурами. Так, на почвах, бедных азотом, малые дозы азотных удобрений (20–40 кг N/га) стимулировали образование клубеньков на корнях растений и их симбиотическую активность (Беспалова, 1985; Посыпанов, 1989; Трепачев, 1999). Однако не для всех симбиотических систем необходимы стартовые дозы азота (Лапинскас, 1998, 2006). В ряде случаев малые дозы азота подавляли симбиотическую активность, которая не восстанавливалась даже на более поздних стадиях развития растений (Звягинцев и др., 1987; Vasiljeva, Kostov, 2001). Противоречивость данных, по-видимому, связана с запасами минерального азота в почве с его доступностью растениям, азотминерализующей способностью, а также другими факторами (рН, влажность, гранулометрический состав и пр.).

При инокуляции штаммом 425 а люцерны в 1,8 раза лучше усваивала атмосферный азот, поскольку у нее на 64% повышался коэффициент азотфиксации (табл. 3.2.1.15). С увеличением доз азота 120 кг N/га азотфиксация у инокулированной люцерны уменьшилась в 2,2 раза, тогда как у инокулированной – в 1,8 раза. Повышение доз азота до 120 кг N/га в условиях орошения светло-каштановых почв (Волгоградское Заволжье) не способствовало росту урожая сена люцерны.

Таблица 3.2.1.15 – Фиксация атмосферного азота люцерной в зависимости от доз азотного удобрения (Лапинскас, 2006)

Доза, кгN/га	Люцерна неинокулированная		Люцерна инокулированная	
	кг/га	% от общего	кг/га	% от общего
0	117	63,0	246	78,2
30	122	56,8	215	69,9
60	87	40,4	174	57,7
90	91	38,9	134	48,4
120	54	25,4	135	45,9

В кормовом севообороте (почва дерново-подзолистая тяжелосуглинистая) сорт клевера ВИК-7 отличался большей продуктивностью по сравнению с Тетраплоидным ВИК (табл. 3.2.1.16). При внесении 30 кг N/га прибавка урожая сена у клевера ВИК-7 составила 23%, при внесении 120 кг N/га продуктивность снижалась (прибавка 20%), тогда как у сорта Тетраплоидный ВИК азотные удобрения снижали урожай сена на 4–6% по сравнению с фоном.

Таблица 3.2.1.16 – Урожай сена различных сортов в клевера в зависимости доз азотных удобрений (Федорова и др., 1983)

Вариант опыта	ВИК-7			Тетраплоидный ВИК		
	урожай, ц/га	прибавка		урожай, ц/га	прибавка	
		ц/га	%		ц/га	ц/га
Без удобрений	67,4	-	-	67,4	-	-
PK	85,4	17,6	35,9	91,9	24,5	36,4
N <sub>30</sub> PK	104,8	19,4	22,7	86,4	-5,5	-6,1
N <sub>120</sub> PK	102,2	16,8	19,6	88,5	-3,4	-4,4

В фазу прорастания содержание фитоглобина (леггемоглобина) в клубеньках обоих сортов клевера под действием азотных удобрений снижалось (табл. 3.2.1.17). В фазу цветения синтез фитоглобина у сорта ВИК-7 прекращался при дозе 120 кг N/га, тогда как у Тетраплоидного ВИК – уже при меньшей дозе, 30 кг N/га (Федорова и др., 1983). При этом в клетках бактериоида заполняется только средняя часть, что свидетельствует об отсутствии синтеза фитоглобина.

Таблица 3.2.1.17 – Содержание фитоглобина в клубеньках различных сортов клевера в зависимости от доз азотных удобрений, мкг/г сырой массы (Федорова и др., 1983)

Вариант	Фаза отрастания		Фаза цветения	
	ВИК-7	Тетраплоидный ВИК	ВИК-7	Тетраплоидный ВИК
Без удобрений	475	520	577	495
PK	745	290	322	466
N <sub>30</sub> PK	463	250	256	фитоглобина нет
N <sub>120</sub> PK	316	160	фитоглобина нет	фитоглобина нет

Таким образом, азотные удобрения в небольших дозах способствуют лучшему усвоению азота бобовыми растениями, тогда как их повышенные и высокие дозы: изменяют ультраструктуру бактериоида, тормозят синтез фитоглобина, подавляют образование и массу клубеньков, снижают коэффициент азотфиксации, усиливают минерализацию и потери почвенного азота. Азотные удобрения, внесенные локально, усиливают потребление азота удобрения, азота почвы и азота атмосферы бобово-злаковыми травами и снижают их газообразные потери.

Решение вопроса повышения эффективности применения азотных удобрений осложняется, с одной стороны, многообразием процессов, протекающих в почве при их внесении, а с другой – сложностью взаимообусловленных и взаимосвязанных реакций азота в системе почва–растение под воздействием как биологических, так и абиотических факторов. Изменение технологии внесения азотных удобрений влечет за собой изменение скорости и направленности как отдельных звеньев, так и в целом круговорота азота в почве и растениях, в результате чего создается определенная экологическая ситуация, определяющая целесообразность используемой технологии.

При конкретных условиях аммонийная и нитратная формы азота могут вызывать конкретные экологические негативные последствия, поэтому оптимизация азотного питания растений достигается при определенных соотношениях этих форм азота в почве. С физиологической точки зрения аммонийная и нитратная формы азота для растений равноценны, хотя пути их поглощения, транспорта и ассимиляции имеют ряд принципиальных различий (Прянишников, 1965). При локальном применении азотных удобрений питание растений смещается в сторону аммонийной формы. При этом изменяются размеры потребления макро- и микроэлементов, интенсивность процессов фотосинтеза, дыхания, роста, формирования химического состава.

Таблица 3.2.1.18 Потребление азота удобрения, азота почвы и атмосферного азота многолетними бобово-злаковыми травами в зависимости от элемента склона и способа внесения азотных удобрений

Вариант	Вынос азота, г/м <sup>2</sup>	N удобрения		N почвы		N симбиотический, г/м <sup>2</sup>
		г/м <sup>2</sup>	КИУА, %	г/м <sup>2</sup>	экстра-N, г/м <sup>2</sup>	
<i>Приводораздельная часть склона, 2–3<sup>0</sup></i>						
P <sub>30</sub> K <sub>30</sub> -фон	9,56	-	-	1,12	-	8,44
Фон + <sup>15</sup> N <sub>30</sub> , разброс	13,02	0,68	22,6	1,44	0,32	10,90
Фон + <sup>15</sup> N <sub>30</sub> , локально	17,50	1,32	43,8	1,88	0,76	14,30
<i>Нижняя часть склона, 5–7<sup>0</sup></i>						
P <sub>30</sub> K <sub>30</sub> -фон	5,95	-	-	0,78	-	5,17
Фон + <sup>15</sup> N <sub>30</sub> , разброс	8,67	0,64	21,2	1,17	0,39	6,86
Фон + <sup>15</sup> N <sub>30</sub> , локально	11,66	1,10	36,6	1,40	0,62	9,16

Азотные удобрения, внесенные локально, повышали потребление азота удобрения бобово-злаковыми травами на 94%, азота почвы – на 30% и симбиотического азота – на 31% в верхней части склона, на 72, 20, 34% соответственно в нижней части склона по сравнению с разбросным их применением (табл. 3.2.1.18). Локализация азотных удобрений способствовала увеличению усвоения дополнительного количества почвенного азота на 30% и симбиотического – на 31% на приводораздельной части склона, на 20 и 34% соответственных нижней части склона. Внесение возрастающих доз азотного удобрения (30–90 кг N/га) снижало азотфиксацию травами как на водоразделе, так и на склонах северной и южной экспозиции (Быстров, Шмырева, 2002).

При локальном внесении азотного удобрения травы лучше (в 1,7–1,9 раза) использовали азот удобрения, при этом больше (в 1,2–1,4 раза) его закрепилось в почве и меньше (в 2,1–2,7 раза) терялось в виде газообразных соединений по сравнению с разбросным способом применения (табл. 3.2.1.19). В нижней части склона травы меньше воспринимали азот удобрения, его меньше закреплялось в почве и больше терялось по сравнению с приводоразделом.

Таблица 3.2.1.19 – Поток и баланс азота удобрения при выращивании многолетних бобово-злаковых трав 1-го г.п. В 3-й ротации севооборота на различных элементах склона в зависимости от способа внесения азотного удобрения

Вариант	Использовано растениями		Закреплено в слое почвы 0–100 см		Газообразные потери	
	1	2	1	2	1	2
Фон + $^{15}\text{N}_{30}$ , разброс	$\frac{0,68}{23}$	$\frac{0,64}{21}$	$\frac{1,03}{34}$	$\frac{0,85}{28}$	$\frac{1,29}{43}$	$\frac{1,51}{51}$
Фон + $^{15}\text{N}_{30}$ , локально	$\frac{1,32}{44}$	$\frac{1,10}{37}$	$\frac{1,21}{40}$	$\frac{1,18}{39}$	$\frac{0,47}{16}$	$\frac{0,72}{24}$

Примечание: 1 – приводораздельная часть склона, 2–3<sup>0</sup>; 2 – нижняя часть склона, 5–7<sup>0</sup>. В числителе – азот удобрения, г/м<sup>2</sup>; в знаменателе – азот удобрения, % от применяемой дозы.

### 3.2.2 Фосфор в питании бобовых растений

Фосфор ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) играет важную роль в жизни бобовых. Он поглощается корнями в виде неорганического фосфата и транспортируется в надземные органы. Фосфор, также как и азот, перераспределяется между органами растения: из листьев он поступает в точки роста, растущие семена и плоды, из стареющих органов – в молодые. Фосфор участвует в процессах синтеза и обмена:

- нуклеиновых кислот и липидов;
- энергетических соединений;
- клеточных белков;
- запасных форм элемента.

Важность и необходимость фосфора в питании бобовых растений связаны с многочисленными реакциями его в биоэнергетике азотфиксации. Так, в клубеньках бобовых  $\text{P}_2\text{O}_5$  содержится в 2,5 раза больше, чем в корнях (Трепачев, 1999). Установлена четкая направленность потоков  $^{32}\text{P}$  от вики к овсу (Ширшов, Пайкова, 1969). Фосфор участвует в реакциях окислительного фосфорилирования с образованием АТФ, которая и является источником энергии для осуществления процесса азотфиксации. В качестве источника электронов, восстанавливающего ферредоксины, выступает пируват.

Ряд бобовых растений (люпин, горох, клевер) способны использовать фосфор труднорастворимых фосфатов почвы. При совместном выращивании вики передает свой фосфор ( $^{32}\text{P}$ ) овсу. При симбиотрофном типе питания на корнях бобовых растений образуются еще симбионт-эндогенные микоризные грибы, обеспечивающие мобилизацию и использование растениями труднорастворимых соединений фосфора в почве (Бабьева, Зенова, 1989). Грибная микориза наиболее характерна для многолетних бобовых трав, имеющих мощную корневую систему с высокой ионной емкостью обмена и значительными объемами выделений, что обеспечивает ее развитие. Тройной симбиоз (симбиотический, ассоциативный, микоризный) бобовых растений имеет целый ряд преимуществ при их возделывании в севообороте:

- перевод труднорастворимых фосфатов в лабильные соединения;
- перекачка фосфатов из глубоких в верхние слои почвы;

- повышение коэффициента использования ранее внесенных фосфорных удобрений;
- снижение потерь фосфора за пределы агрофитоценоза.

Фосфор суперфосфата активно поступает в растения клевера (табл. 3.2.2.1). Наибольшее количество  $^{32}\text{P}$  транспортировалось в листья, где проходят процессы его метаболизма в реакциях фотосинтеза и дыхания. В черешках листьев содержится меньшее количество меченого фосфора.

Таблица 3.2.2.1 – Поступление радиоактивного фосфора и радиоактивной серы из суперфосфата в черешки и листья клевера

Вариант	Орган растения	Интенсивность поступления, им./мин на 1 г с.в.	
		$^{32}\text{P}$	$^{35}\text{S}$
NPK(суперфосфат, меченный $^{32}\text{P}$ )	Листья	$2,24 \cdot 10^3$	-
	Черешки	$0,88 \cdot 10^3$	-
NPK (суперфосфат, меченный $^{32}\text{P}$ и $^{35}\text{S}$ )	Листья	$1,56 \cdot 10^3$	$11,9 \cdot 10^3$
	Черешки	$1,0 \cdot 10^3$	$5,05 \cdot 10^3$
NPK (суперфосфат, меченный $^{35}\text{S}$ )	Листья	-	$8,55 \cdot 10^3$
	Черешки	-	$3,75 \cdot 10^3$

Значительная масса корневых систем бобовых растений (люцерна, люпин, клевер, эспарцет) обогащают почву не только симбиотическим азотом, но и органическим фосфором, доступность которого определяется активностью микроорганизмов (Андрианов, 2004).

Для формирования урожая зерна люпин, люцерна, клевер и соя расходуют наибольшее количество фосфора (18–21 кг P/т) (табл. 3.2.2.2). Эти же культуры используют максимальное количество  $\text{P}_2\text{O}_5$  для формирования урожая сена (8–10 кг P/т) (Трепачев, 1999; Лошаков, 2015; Шаповал и др., 2015). Среднее количество фосфора (15–17 кг P/т) расходуют бобы, вика, горох, фасоль, чечевица, эспарцет. Эти же культуры используют 4–5 кг P/т фосфора для формирования урожая сена. Минимальное количество  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 11–12 кг P/т, при выращивании на семена расходуют бобы, вика, сераделла, чечевица; 3–4 кг P/т – на сено. Расход фосфора люцерной повышался при увеличении содержания подвижных фосфатов в почве. Содержание фосфора в зерне бобовых растений составляет 0,98–1,42%, в сене – 0,24–0,91%.

В условиях карбонатного чернозема люцерна первого года пользования формировала урожай сена в зависимости от количества подвижных фосфатов в почве (табл. 3.2.2.3). Урожай сена повышался до 50–60 мг P/кг в почве как в первый, так и во второй год пользования. Дальнейшее повышение содержания  $\text{P}_2\text{O}_5$  в почве сопровождалось снижением массы надземных органов люцерны. Люпин хорошо использует последствие фосфорных удобрений при выращивании его на семена. Лучшие условия для формирования генеративных органов создаются при совместном внесении фосфорных и калийных удобрений (соотношение 1:2). Люпин лучше других культур использует фосфор фосфоритной муки и фосфогипса (Новиков и др., 2002).

Таблица 3.2.2.2 – Содержание фосфора в бобовых и его расход

Растение	Продукция	Фосфор	
		содержание, %	расход, кг/т
Бобы	зерно	1,21	12–15
	солома	0,29	3–4
Вика	зерно	0,99	13–16
	солома	0,44	4–5
Горох	зерно	1,00	15–17
	солома	0,35	3–4
Клевер	зерно	1,27	17–18
	солома	0,67	5–7
Люпин	зерно	1,42	19–21
	солома	0,25	7–10
Люцерна	зерно	1,31	16–18
	солома	0,65	5–8
Сераделла	зерно	1,05	12–13
	солома	0,91	7–9
Соя	зерно	1,04	12–18
	солома	0,31	6–7
Фасоль	зерно	1,38	12–15
	солома	0,24	3–4
Чечевица	зерно	0,98	13–14
	солома	0,37	3–5
Эспарцет	зерно	1,31	15–17
	солома	0,46	5–7

В условиях дерново-подзолистой почвы на фоне  $^{32}\text{P}$  растительных остатков клевера и  $^{32}\text{P}$  суперфосфата озимая пшеница в начале роста (20 суток) лучше использовала фосфор удобрений. Через 30 суток озимая пшеница усваивала лучше фосфор клевера, чем удобрения (Фокин и др., 1980). К концу вегетации озимая пшеница в три раза лучше использовала фосфор из органических остатков по сравнению с суперфосфатом. За 80 суток вегетации озимая пшеница использовала 29%  $\text{P}_2\text{O}_5$  остатков клевера и 9,5% фосфора удобрения. Лучшее использование фосфора растительных остатков пшеницей, по-видимому, связано с поступлением свежего органического вещества, активизирующего деятельность гетеротрофных микроорганизмов.

Таблица 3.2.2.3 – Урожай сена люцерны в зависимости от содержания подвижных фосфатов в черноземе карбонатном, ц/га

Культура, годы жизни	Содержание $\text{P}_2\text{O}_5$ в почве, мг/кг									
	10	15	20	25	30	35	40	50	60	80
Люцерна 1-го года жизни	112	129	140	147	153	156	159	160	158	147
Люцерна 2-го года жизни	130	149	162	171	178	182	185	186	184	172
За два года	243	278	302	319	330	339	334	347	343	320

На дерново-подзолистой песчаной почве (повышенное содержание подвижных фосфатов) при внесении 30 кг P/га снижалось накопление азота в урожае люпина (табл. 3.2.2.4). Внесение калийных удобрений в дозе 60 кг K/га обеспечивало существенное (в 1,4 раза) повышение накопления

азота в растениях. Увеличение дозы фосфорных удобрений до 60 кг P/га (на фоне P<sub>30</sub>K<sub>60</sub>) не вызывало изменений в накоплении азота и в формировании биомассы. Благодаря мощной корневой системе и ее активной выделительной функции люпин способен поглощать труднорастворимые фосфаты, поэтому дополнительное внесение фосфорных удобрений эффекта не дает. Кроме того, способность люпина к симбиотической азотфиксации и значительному усвоению азота сопровождается снижением удельной значимости фосфора в бобовых растениях по сравнению со злаковыми культурами.

Таблица 3.2.2.4 – Вынос азота с урожаем люпина в зависимости от соотношения P и K (Трепачев, 1999)

Вариант	Сухое вещество, ц/га	Вынос азота, кг/га
Фон (доломитовая мука)	40,3	98,7
Фон + P <sub>30</sub>	32,2	85,3
Фон + P <sub>30</sub> K <sub>60</sub>	44,8	102,1
Фон + P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	45,3	110,0

При выращивании сераделлы на дерново-подзолистой песчаной почве содержание азота и фосфора в биомассе под действием удобрений не менялось, увеличивалось только содержание калия (на 25% по отношению к контролю) (табл. 3.2.2.5). При повышенном содержании подвижных фосфатов увеличение доз фосфорных удобрений до 90 кг P/га снижало азотфиксацию, но не меняло продуктивности растений. Наибольшей азотфиксирующей способностью они обладали при совместном применении фосфорных и калийных удобрений по 90 кг/га действующего вещества. При этом сераделла формировала самую высокую биомассу надземных органов (Трепачев, 1999).

Однолетние бобовые растения за два года потребляли следующее количество общего азота (в том числе симбиотического) на фоне 150 кг P/га:

	N <sub>общ</sub> , кг/га	N <sub>симб</sub> , кг/га	K <sub>азотф</sub> , %
Клевер луговой	397	314	79
Люцерна посевная	519	436	84
Эспарцет песчаный	410	327	80

Независимо от погодных условий люцерна превосходила клевер и эспарцет по усвоению общего и симбиотического азота (Трепачев, 1999).

Таблица 3.2.2.5 – Влияние фосфорных и калийных удобрений на азотфиксацию и урожайность сена сераделлы (Трепачев, 1999)

Вариант	Содержание элементов в сене, %			Масса сырых клубеньков, г/100 растений	Биологическая азотфиксация, кг/га	Урожай сена, ц/га
	азот	фосфор	калий			
Контроль	2,86	0,76	2,44	17,00	87,4	48,2
P <sub>45</sub>	2,84	0,75	2,56	22,40	92,9	51,3
P <sub>90</sub>	2,92	0,74	2,70	25,3	90,2	53,1
P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	2,96	0,73	3,05	27,6	146,2	67,2

НСР<sub>05</sub>

7,7-8,4

При содержании в серой лесной почве 150 мг/кг подвижного фосфора масса клубеньков, количество леггемоглобина, азотфиксация и продуктивность растений вики и гороха приближались к максимуму (табл. 3.2.2.6). Дальнейшее повышение содержания подвижного фосфора в почве несколько усиливало симбиотическую азотфиксацию азота, но не повышало урожай семян растений. При низкой обеспеченности почвы подвижным фосфором (59 мг/кг) снижается в 1,5 раза масса клубеньков и в 3,3 раза – содержание в них леггемоглобина, резко подавляется фотосинтетическая деятельность листового аппарата.

Люцерна изменчивая (сорт Вега 87) на дерново-подзолистой почве формировала симбиотический аппарат в зависимости от количества подвижного фосфора (23–167 мг  $P_2O_5$ /кг) в почве (табл. 3.2.2.7). Масса клубеньков и содержание леггемоглобина с повышением уровня подвижного фосфора в почве достигали максимума при 126 мг  $P_2O_5$ /кг.

Таблица 3.2.2.6 – Влияние уровня обеспеченности подвижным фосфором на симбиотическую и фотосинтетическую деятельность растений вики и гороха (Петухов, 1995)

Показатель	Содержание $P_2O_5$ , мг/кг			
	59	100	150	198
<i>Вика посевная</i>				
Масса активных клубеньков, г/сосуд	1,3	1,9	2,1	1,9
ЛБ, мг/г сырых клубеньков	3,6	8,3	8,2	8,5
N в растениях, г/сосуд	1,15	1,53	1,59	1,76
Увеличение $N_{фикс.}$ , мг/сосуд	-	380	440	610
Площадь листьев, $dm^2$ /сосуд	13	23	24	25
Абс. сух. в-во, г/сосуд	36,7	50,2	53,1	53,6
Семян, г/сосуд	10,6	14,2	14,5	14,5
<i>Горох посевной</i>				
Масса активных клубеньков, г/сосуд	1,6	2,6	2,7	2,5
ЛБ, мг/г сырых клубеньков	3,8	8,3	8,9	8,6
N в растениях, г/сосуд	0,86	1,41	1,63	1,63
Увеличение $N_{фикс.}$ , мг/сосуд	-	550	770	770
Площадь листьев, $dm^2$ /сосуд	9	22	23	24
АСВ, г/сосуд	33,3	56,1	58,3	57,8
Семян, г/сосуд	13,0	21,0	21,5	21,4

Таблица 3.2.2.7 – Симбиотическая активность люцерны (фаза цветения) в зависимости от содержания подвижного фосфора в почве

Показатели	Содержание $P_2O_5$ , мг/кг				
	23	48	66	126	167
Масса клубеньков, мг/сосуд	62	249	1020	2983	3022
в том числе активных, %	16	29	78	96	97
Леггемоглобин, мг/г	-	-	1,9	2,8	2,8
Превышение $N_{фикс.}$ , мг/сосуд	-	122	399	678	677

Дальнейшее повышение количества подвижного  $P_2O_5$  незначительно меняло азотфиксацию. С понижением уровня подвижного фосфора в почве масса активных клубеньков уменьшается в 2,9 раза, фиксация азота – в 1,6 раза, накопление сухого вещества – в 1,3 раза по сравнению с повышенным содержанием  $P_2O_5$ . Содержание подвижных соединений фосфора в почве

является важнейшим условием оптимизации азотфиксации и формирования продуктивности бобовых растений. Для расчета применения необходимой дозы фосфорного удобрения необходимо знать:

- исходное содержание подвижных соединений фосфора в почве;
- оптимум фосфора в почве для активной азотфиксации и оптимальной продуктивности растений;
- возможное увеличение содержания подвижных фосфатов при внесении определенной дозы удобрения.

Оптимальные индексы содержания подвижного  $P_2O_5$  колеблется в широких пределах – 30–120 мг/кг (табл. 3.2.2.8). Для поднятия его уровня в почве на 1 мг (при низкой обеспеченности подвижными фосфатами) необходимо внести сверх выноса, кг  $P_2O_5$ /га:

- на дерново-подзолистой – 40–120;
- на черноземах – 50–70;
- на карбонатном черноземе – 90–130.

Равновесие по содержанию подвижных форм  $P_2O_5$  устанавливается через год. В силу генетической неоднородности содержания различных минеральных форм фосфатов в дерново-подзолистых почвах метод Кирсанова (0,2н HCl) в ряде случаев не соответствует эффективности фосфорных удобрений, тогда как метод Соколова (0,1н  $NH_4F$ , pH 6,3) достаточно полно отражает их обеспеченность фосфором (Бабарина, Мельникова, 1989). Определение  $P_2O_5$  в дерново-подзолистой почве по методу Кирсанова не всегда отвечает понятию «подвижные фосфаты», поскольку в вытяжку переходят фосфаты апатитовой структуры, фосфор которых недоступен растениям (Дерюгин, Прокошев, 1990).

Таблица 3.2.2.8 – Индексы оптимального содержания подвижного фосфора в почве под бобовые растения (Трепачев, 1999)

Почвы	Индекс оптимального содержания $P_2O_5$ , мг/кг
Дерново-подзолистые	80–100
Серые лесные	80–100
Черноземы: типичный, выщелоченный, обыкновенный	90–120
Лугово-черноземовидная	90–120
Чернозем карбонатный	30–35
Каштановые	30–35

Это положение не распространяется на клевер, люцерну и люпин, поскольку они обладают свойствами, обеспечивающими использование и усвоение труднодоступных соединений фосфора. В условиях сухостепной зоны (Нижнее Поволжье, Астраханская, Омская, Пензенская, Оренбургская, Самарская, Саратовская обл.) среди зернобобовых культур наибольшее распространение получил нут (Балашов и др., 2002). Отличительные признаки нута: он не полегает, меньше поражается болезнями и вредителями, не осыпается, жаростоек и засухоустойчив, лучший предшественник в севооборотах. Для него характерен высокий уровень белка (до 31%) и жира (55–60%) в семенах. Этому способствует высокая эффективность бобово-ризобияльного симбиоза (БРС). Наибольшее количество клубеньков на корнях нута

образовывалось при внесении 20 кг  $P_2O_5$ /га, тогда как большее количество азота растения фиксировали при  $N_{20}P_{20}$  и инокуляции семян штаммом 527; при этом масса зерна возрастала в 1,5–2,5 раза (Лактионов и др., 2013).

### 3.2.3 Калий в питании бобовых культур

По степени доступности растениям соединения калия в почве подразделяются на следующие формы:

- водорастворимый калий;
- обменный калий;
- калий силикатных минералов.

Калий мусковита и биотипа легко переходит в обменную форму. Из почвенно-поглощающего комплекса калий вытесняется магнием или кальцием. Для растений доступен калий мелкодисперсной фракции почвы. По мере потребления калия он из обменного состояния переходит в почвенный раствор (табл. 3.2.3.1).

Таблица 3.2.3.1 – Содержание подвижного калия в почвах, мг  $K_2O$ /100г почвы

Почвы	$K_2O$
Подзолистые супесчаные	4–9
Сильно- и среднеподзолистые суглинистые	7–12
Слабоподзолистые суглинистые	15–20
Средне- и слабоподзолистые глинистые	20–25
Оподзоленные и выщелоченные черноземы	25–35
Мощные и обыкновенные черноземы	40–50

Содержание водорастворимого калия в почве незначительно – 1–10 мг  $K_2O$ /кг, в калийном питании бобовых растений может участвовать до 90% (от общего количества) необменного калия почвы (Пчелкин, 1966).

Калий содержится в почве в следующих формах:

- минеральные соли почвенного раствора;
- обменное и необменное состояние в коллоидных частицах;
- в составе кристаллической решетки минералов;
- в микроорганизмах и растительных остатках.

В растениях калий в наибольшем количестве находится в молодых тканях; 80% содержится в вакуолях растительных клеток. До 20% калия клетки связаны с коллоидами цитоплазмы.

В организме бобовых растений калий выполняет ряд функций:

- стабилизирует структуру хлоропластов и митохондрий;
- определяет физико-химические свойства цитоплазмы;
- регулирует поглощение воды корнями;
- регулирует процессы открывания и закрывания устьиц;
- создает мембранный потенциал;
- активизирует ферментные системы;
- регулирует включение фосфата в органические соединения;
- регулирует углеводный обмен.

При недостатке калия в почве резко снижается продуктивность фотосинтеза за счет уменьшения скорости оттока ассимилятов из листьев.

При недостатке калия в почве:

- понижается способность плазменных коллоидов удерживать воду;
- теряется тургор и усиливается завядание;
- падает ассимиляция  $\text{CO}_2$  растениями;
- снижается симбиотическая фиксация азота растениями;
- задерживается превращение моносахаров в полисахариды;
- подавляется синтез белков, идет накопление небелковых соединений;
- снижается устойчивость к патогенам (бактериям, грибам);
- изменяется качество зерна и сена.

Для формирования урожая зерна бобовые растения расходуют 15–49 кг  $\text{K}_2\text{O}/\text{т}$ , соломы – 8–24 кг  $\text{K}_2\text{O}/\text{т}$  (табл. 3.2.3.2). Максимальное количество калия на формирование 1 т зерна расходует люпин (49 кг), на 1 т соломы – сераделла (24 кг).

Таблица 3.2.3.2 – Содержание калия в бобовых и его расход

Растение	Продукция	Калий	
		содержание, %	расход, кг/т
Бобы	зерно	1,29	25–29
	солома	1,94	19–24
Вика	зерно	0,80	15–16
	солома	0,63	8–10
Горох	зерно	1,15	19–31
	солома	1,01	8–10
Клевер	зерно	1,67	27–31
	солома	1,55	15–18
Люпин	зерно	1,45	43–49
	солома	1,17	18–34
Люцерна	зерно	1,59	29–33
	солома	1,40	14–25
Сераделла	зерно	2,34	39–44
	солома	2,20	24–32
Соя	зерно	1,26	36–40
	солома	0,50	16–22
Фасоль	зерно	1,72	24–33
	солома	0,91	13–15
Чечевица	зерно	0,88	25–28
	солома	0,65	9–11
Эспарцет	зерно	1,42	35–37
	солома	1,30	16–19
Нут	зерно	1,44	47–53
	солома	1,12	19–31
Чина	зерно	1,30	28–35
	солома	1,10	15–19

Коэффициент азотфиксации у люпина зависит от погодных условий в период вегетации растений: 60–70% у синего и 80–90% у желтого в благоприятный год и 30–40% и 60–70% в неблагоприятный соответственно. На почве с низким уровнем плодородия коэффициент азотфиксации у люпина снижается (табл. 3.2.3.3).

Таблица 3.2.3.3 – Коэффициент азотфиксации люпина синего, % (Завалин, 2005)

Вариант	Дерново-подзолистая почва	
	высокий уровень плодородия	низкий уровень плодородия
Без удобрений	46	25
$K_{90}$ ( $K_{MГ}$ )	60	53
$P_{90} K_{90}$ ( $K_Z$ )	53	44
$P_{90} K_{180}$ ( $K_{MГ}$ )	49	51

Внесение калийных удобрений повышало коэффициент азотфиксации люпина на 30% при его выращивании на высокоплодородной почве и на 18% – на почве с низким уровнем плодородия (Завалин, 2005). Внесение повышенной дозы калия (150 кг  $K_2O$ /га) даже на слабокультуренной дерново-подзолистой или серой лесной почвах не увеличивает фиксацию азота растениями по сравнению с дозами 60–90 кг  $K_2O$ /га.

Количество биологического азота в урожае желтого люпина растет за счет инокуляции от 161 до 249 кг  $N_2$ /га в благоприятный год и с 46 до 90 кг  $N_2$ /га в неблагоприятный (Завалин, 2005).

Наибольшее количество атмосферного азота накапливалось в ПКО люпина при внесении  $P_{90}K_{120}$  в дозе 74 кг  $N_2$ /га. Количество биологического азота в растительных остатках повышалось под действием калийных удобрений до 70 кг  $N_2$ /га на высокоплодородной почве и до 59 кг  $N_2$ /га – на почве с низким уровнем плодородия.

Оптимальной обеспеченностью растений вики и гороха подвижным калием в серой лесной почве считается 150 мг/кг (табл. 3.2.3.4). При снижении количества подвижного калия в почве до 60 мг/кг уменьшается в 1,4 раза масса активных клубеньков, в 1,6–1,8 раза – содержание леггемоглобина в них, а также в 1,4–1,9 раза – площадь листьев. В результате снижается в 1,3–1,7 раза накопление сухого вещества и в 1,6–1,7 раза семенная продуктивность (Петухов, 1995). Повышение количества подвижного калия в почве до 200 мг/га не влияло на урожай семян вики и гороха по сравнению с оптимальным его содержанием.

Люцерна (сорта Вега 87) в условиях дерново-подзолистой почвы формировала симбиотический аппарат в зависимости от содержания подвижного калия (27–205 мг/кг) (табл. 3.2.3.5). Масса клубеньков и количество леггемоглобина в них с увеличением подвижности калия достигали максимума при 158 мг  $K_2O$ /кг.

Дальнейшее повышение количества подвижного калия не меняло азотфиксирующей активности люцерны, то есть наибольшая симбиотическая активность и продуктивность люцерны достигаются при 160 мг  $K_2O$ /кг в почве. Снижение уровня подвижного калия в почве уменьшали массу клубеньков и количество фиксированного азота в два раза.

Таблица 3.2.3.4 – Влияние уровня обеспеченности подвижным калием (мг/кг почвы по Чирикову) на симбиотическую и фотосинтетическую деятельность растений вики и гороха (Петухов, 1995)

Показатель	60	100	146	200
<i>Вика посевная</i>				
Масса активных клубеньков, г/сосуд	1,4	2,0	2,0	2,0
Лб, мг/г сырых клубеньков	4,7	8,5	8,5	8,6
N в растениях, г/сосуд	1,15	1,34	1,66	1,48
Увеличение $N_{\text{фикс}}$ , мг/сосуд	-	190	510	330
Площадь листьев, $\text{дм}^2/\text{сосуд}$	16	21	23	24
Абс. сух. в-во, г/сосуд	36,3	47,8	51,6	52,7
Семян, г/сосуд	9,3	14,0	14,4	14,8
<i>Горох посевной</i>				
Масса активных клубеньков, г/сосуд	1,7	2,3	2,6	2,5
Лб, мг/г сырых клубеньков	5,4	8,7	8,4	8,7
N в растениях, г/сосуд	0,37	1,45	1,57	1,48
Увеличение $N_{\text{фикс}}$ , мг/сосуд	-	580	700	610
Площадь листьев, $\text{дм}^2/\text{сосуд}$	11	21	21	21
Абс. сух. в-во, г/сосуд	33,2	55,6	56,3	56,8
Семян, г/сосуд	12,4	20,5	20,9	20,8

Таблица 3.2.3.5 – Симбиотическая активность люцерны (фаза цветения) в зависимости от содержания подвижного калия в почве

Показатели	Содержание $K_2O$ , мг/кг				
	27	53	92	158	205
Масса клубеньков, мг/сосуд	20	326	1611	3258	3277
в том числе активных, %	20	36	88	100	100
Леггемоглобин, мг/г	-	-	1,7	2,7	2,6
Превышение $N_{\text{фикс}}$ , мг/сосуд	-	145	397	801	799

Для основных типов почв определены индексы оптимального содержания калия в 30-сантиметровом слое, обеспечивающие активную фиксацию азота растениями и их продуктивность (табл. 3.2.3.6). Степень обеспеченности  $K_2O$  должна устанавливаться для каждой разновидности почв с учетом ряда факторов (биологическая особенность культуры, влагообеспеченность, минералогический состав, дозы и соотношения азотных и фосфорных удобрений). Не установлено четкой зависимости между степенью насыщенности ППК калием, содержанием его обменной формы в почве и эффективностью калийных удобрений (Бабарина, Мельникова, 1989). Азотфиксация люцерны и клевера за счет инокуляции в условиях дерново-подзолистой почвы повышалась на 29–30% (табл. 3.2.3.6). При применении биопрепаратов интенсивность фиксации азота бобовыми растениями может быть повышена не менее чем в три раза (Вэнс, 2002; Тихонович и др., 2011; Попов и др., 2012).

Наибольшее количество биологического азота бобово-злаковые травосмеси фиксировали при совместно применении калийных удобрений (180 кг  $K_2O/\text{га}$ ) и симбиотических штаммов (Лазарев, Стародубцева, 2017).

Таблица 3.2.3.6 – Индексы оптимального содержания подвижного калия в почве под бобовые растения (Трепачев, 1999)

Почвы	Индекс оптимального содержания К <sub>2</sub> О, мг/кг
Дерново-подзолистые	120–150
Серые лесные	120–150
Черноземы: типичный, выщелоченный, обыкновенный	100–130
Лугово-черноземовидная	100–130
Чернозем карбонатный	270–300
Каштановые	200–250

Применение калийных удобрений в повышенной дозе (на дерново-подзолистой почве с содержанием 10 мг/100 г подвижного калия) усиливало фиксацию азота люцерно-злаковой травосмесью на 26%, тогда как у клеверозлаковой – снижало на 23%. Повышенные дозы калия затягивают вегетацию растений, тормозят отток (поступление) углеводов из листьев в клубеньки и тем самым оказывают ингибирующее действие на их образование, рост и развитие (Посыпанов, 1991; Трепачев, 1999; Аленин, Двойникова, 2011). В то же время инокуляция снижает негативное действие калия на эффективность ризобиального комплекса, в результате фиксация азота клеверозлаковой травосмесью увеличивается на 24%.

Таблица 3.2.3.7 – Размеры азотфиксации бобовых трав в зависимости от инокуляции и применения калийных удобрений, кг/га (Лазарев, Стародубцева, 2017)

Состав травостоя	Без инокуляции	Инокуляция	Калий (К <sub>180</sub> )	Калий + инокуляция
Злаки	0,0	0,0	0,0	0,0
Злаки + люцерна	100,5	129,3	161,9	176,7
Злаки + клевер	144,1	188,2	148,2	182,9

### 3.2.4 Эффективность и целесообразность применения минеральных удобрений под бобовые растения

Что касается применения минеральных удобрений при выращивании бобовых, основной мерой должны стать энергетические, экологические и экономические критерии, поскольку эти культуры обладают уникальной способностью фиксировать азот и углерод атмосферы, синтезировать легкоусвояемые белки и повышать плодородие почвы. Бобовые растения нуждаются в полном минеральном удобрении на легких песчаных и супесчаных почвах. В этих условиях они успешно используют азот удобрения наравне со злаковыми культурами, не нарушая азотфиксации. В полном минеральном удобрении нуждаются смешанные посевы бобовых со злаками и посевы на почвах более тяжелого гранулометрического состава.

При содержании 40–50 кг N/га в почве задерживается на 10–15 дней образование розовых клубеньков на корнях клевера (Трепачев, 1999). При этом не стимулируются образование и активность нитрогеназы. Избыток NO<sub>3</sub><sup>-</sup> в клетке тормозит образование аминокислот из кетокислот и аммиака. В результате снижается синтез леггемоглобина и переход его в активную форму. В итоге содержание азота в бобовых растениях не меняется. Однако на

хорошо окультуренных почвах этого не происходит под действием азотных удобрений. Более того, применение фосфорных и калийных удобрений не усиливает азотфиксацию (Трепачев, 1999). Однако бобовые растения хорошо используют последние органических удобрений.

Не дало положительного эффекта применения калийных удобрений под люпин и клевер при низкой обеспеченности легкой почвы подвижным калием (2,5 мг  $K_2O/100$  г). Причины пониженной требовательности бобовых растений к уровню обеспеченности почвы подвижными формами фосфора и калия следующие: хорошая обеспеченность растений азотом в период стеблевания – образование репродуктивных органов способствует интенсивному метаболизму мобилизованных зольных элементов; усиливается экскреция корней, стимулирующая превращение малодоступных элементов почвы в более доступные формы; разрастается микориза, гифы которой повышают поглощающую поверхность корневой системы. В результате микориза усиливает поступление фосфора и калия в растения, поэтому ее можно сравнить с ролью клубеньковых бактерий в снабжении бобовых азотом (Бабьева, Зенова, 1989; Петухов, 1995; Трепачев, 1999). При этом не меньшую роль играет соотношение подвижных форм фосфора и калия в почве, а также режим увлажнения. Бобовые культуры хорошо используют фосфор и калий в последствии органических и минеральных удобрений и своими остатками создают повышенное эффективное плодородие для последующих культур.

Условия произрастания и биологические особенности культуры определяют размер потребления элементов питания (азот, фосфор, калий) в процессе вегетации бобовыми растениями (Лапа и др., 2011; Боровик и др., 2011; Котлярова, Лубенцов, 2016). Благодаря азотфиксации бобовые растения потребляют значительное количество азота (80–390 кг N/га) (табл. 3.2.4.1). Наибольшее количество азота (свыше 300 кг N/га) потребляют клевер, козлятник, люпин, люцерна, лядвенец.

Таблица 3.2.4.1 – Потребление элементов питания бобовыми растениями

Растение	Вид продукции	Элементы питания, кг/га		
		азот	фосфор	калий
Бобы	зерно	100–180	35–45	90–120
Вика	зерно	140–200	30–50	120–145
Горох	зерно	80–130	30–60	40–80
Донник	сено	150–200	30–50	150–180
Клевер луговой	сено	210–350	50–65	200–270
Козлятник восточный	сено	130–380	40–100	100–340
Люпин многолетний	сено	200–260	60–70	100–180
Люпин однолетний	зерно	300–360	70–90	140–200
	сено			
Люцерна посевная	сено	250–390	60–100	150–350
Лядвенец рогатый	сено	250–370	60–85	140–220
Сераделла	сено	120–150	20–50	100–140
Соя	зерно	170–250	60–80	120–170
Фасоль	зерно	80–150	30–40	70–100
Чечевица	зерно	140–170	30–60	100–140
Чина	зерно	130–150	30–45	100–120
Эспарцет	сено	200–230	50–80	130–200

Минимальное количество азота (менее 150 кг N/га) потребляют горох, сераделла, фасоль, чина. Бобовые значительно меньше усваивают фосфора (30–100 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га) (по сравнению с азотом). Однако они потребляют значительное количество калия. Для формирования урожая сена люцерны и козлятник используют свыше 300 кг K<sub>2</sub>O/га. В основном бобовые растения потребляют 100–300 кг K<sub>2</sub>O/га. На дерново-подзолистой песчаной почве сераделла обладала наибольшей азотфиксацией и формировала наибольшую массу клубеньков при внесении калийных удобрений (табл. 3.2.4.2). Эффективность 90 кг K<sub>2</sub>O/га по действию на азотфиксацию составила 34% по отношению к контролю.

Таблица 3.2.4.2 – Продуктивность и азотфиксация сераделлы в зависимости от дозы и вида минерального удобрения (Трепачев, 1999)

Вариант	Масса сырых клубеньков, г/100 раст.	Биологическая азотфиксация, кг/га	Урожай сена, ц/га
Без удобрений	17,0	87,4	48,2
N <sub>60</sub>	17,8	90,3	56,0
P <sub>90</sub>	25,3	90,2	53,1
K <sub>90</sub>	25,4	116,9	64,0
N <sub>60</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	17,3	92,7	73,1

Однако наибольший урожай сена сераделла формировала при внесении полного минерального удобрения в дозе N<sub>60</sub> P<sub>90</sub> K<sub>90</sub>. Среди отдельных видов наибольшей эффективностью (33%) отличались калийные удобрения. Азотные удобрения снижали массу клубеньков и их активность на 32 и 21% соответственно по сравнению с внесением калийных удобрений. Известкование, фосфорные и калийные удобрения (внесенные в запас) обеспечивали наилучшие условия фиксации азота люцерной при ее выращивании на дерново-подзолистой почве (табл. 3.2.4.3).

Таблица 3.2.4.3 – Размеры фиксации азота люцерной второго года пользования в зависимости от погодных условий и условий минерального питания (Трепачев и др., 1999)

Вариант	Фиксация азота, кг/га			За три укоса
	1-й укос	2-й укос	3-й укос	
<i>Влажный год</i>				
Известь + Мо (фон)	63,3	136,3	71,4	271,0
Фон + P <sub>180</sub> K <sub>270</sub>	70,6	140,4	76,6	287,6
Фон + N <sub>36</sub> P <sub>180</sub> K <sub>270</sub>	37,9	70,8	68,1	176,8
Фон + N <sub>72</sub> P <sub>180</sub> K <sub>270</sub>	12,8	45,0	65,6	123,4
<i>Засушливый год</i>				
Известь + Мо (фон)	54,4	27,8	97,8	180,0
Фон + P <sub>180</sub> K <sub>270</sub>	60,7	28,3	82,9	171,9
Фон + N <sub>36</sub> P <sub>180</sub> K <sub>270</sub>	46,8	19,1	42,8	108,7
Фон + N <sub>72</sub> P <sub>180</sub> K <sub>270</sub>	20,5	16,5	-	37,0

В засушливую погоду азотфиксация растениями снижалась: на фоне – на 34%, а при внесении удобрений – на 38–60%. Применение полного удобрения с азотом уменьшало фиксацию азота во влажный год на 39–57% и в засушливый год – на 37–78% по отношению к РК (Трепачев и др., 1999).

Мелкая обработка чернозема типичного снижала урожай зерна гороха на 19–27%, отказ от обработки – в дальнейшем на 23–36% (табл. 3.2.4.4). Минеральные удобрения при различных системах обработки повышали урожай зерна на 4–6 ц/га. Наибольший урожай зерна горох формировал по вспашке и внесению полного минерального удобрения ( $N_{50}P_{70}K_{40}$ ). В этих же условиях накапливалось наибольшее количество сырого белка и нитратов в зерне. Минимальная обработка почвы снижала количество белка и  $NO_3^-$  в зерне. Максимально удобрения повышали содержание сырого белка в зерне на 2,3–3,4% (Котлярова и др., 2012; Котлярова, Лубенцов, 2016).

В условиях серых лесных почв (содержание гумуса 4,1–5,0%,  $pH_{\text{сол}}$  5,0–5,3) сорта гороха без применения удобрений формировали урожай зерна в пределах 34–36 ц/га (табл. 3.2.4.5). При внесении первой дозы полного минерального удобрения ( $N_{42}P_{91}K_{91}$ ) урожай зерна повышался на 4–5 ц/га (12–15%).

Таблица 3.2.4.4 – Влияние способов обработки почвы и минеральных удобрений на урожайность и качество зерна гороха (Котлярова и др., 2012)

Способ обработки почвы	Дозы удобрений	Урожай зерна, ц/га	Сырой белок, %	Нитраты, мг/кг
Вспашка (контроль)	Без удобрений	29,3	21,3	33,9
	$N_{50}P_{70}K_{40}$	33,4	23,5	35,4
	$N_{100}P_{140}K_{80}$	31,3	24,7	35,6
Мелкая	Без удобрений	21,3	20,9	29,7
	$N_{50}P_{70}K_{40}$	23,8	22,1	30,7
	$N_{100}P_{140}K_{80}$	27,8	23,2	31,8
Нулевая	Без удобрений	18,8	20,6	28,4
	$N_{50}P_{70}K_{40}$	20,0	21,5	28,9
	$N_{100}P_{140}K_{80}$	22,5	22,2	31,7

Таблица 3.2.4.5 – Влияние минеральных удобрений на урожайность зерна различных сортов гороха (Голопятов, Кондрашин, 2016)

Сорт	Урожайность зерна, ц/га			Прибавка	
	контроль	$N_{42}P_{91}K_{91}$	$N_{47}P_{104}K_{104}$	ц/га	%
Софья	34,0	39,0	38,0	5,0	15
Л-109-Б	34,0	38,0	37,0	4,0	12
Л-375	36,0	41,0	40,0	5,0	14

При внесении второй дозы минеральных удобрений ( $N_{47}P_{104}K_{104}$ ) урожай зерна снизился по всем сортам на 1 ц/га. Наибольший урожай зерна (36–41 ц/га) формировал сорт гороха Л-375 (Голопятов, Кондрашин, 2016).

В последние годы существенно снизилось плодородие дерново-подзолистых почв Нечерноземной зоны (Сычев, Шафран, 2012). Причиной тому является резкое сокращение применения органических и минеральных удобрений. В результате потребление элементов питания сельскохозяйственными культурами превышает их восполнение с удобрениями в 2,7 раза. Решение проблемы возможно путем введения травопольных севооборотов с 40% бобовых трав, что обеспечит воспроизводство плодородия почв. Так, долготлетние смеси люцерны с кострцом и тимфеевкой по продуктив-

ности сухого вещества превосходят клеверозлаковые смеси в 1,2–2,1 раза (Лазарев, 2005). Люцерно-злаковые смеси отличаются повышенной зимостойкостью, устойчивостью к болезням, вредителям и сорнякам, повышенным качеством корма (Писковацкий, 2012). Люцерна превосходит клевер по долголетию (травостой – более 7 лет) и засухоустойчивости (Лазарев и др., 2010). После люцерны и козлятника в почву поступает в 1,7–1,8 раза больше ПКО, а также 200–400 кг N/га (Парахин, Петрова, 2009).

В чистых посевах на дерново-подзолистой почве наибольшее количество биомассы и симбиотического азота накапливала люцерна; козлятник и клевер уступали ей. Люцерна фиксировала более 200 кг N<sub>2</sub>/га; козлятник и клевер – по 130 кг N<sub>2</sub>/га (Эседулаев, Шмелева, 2016). Полное минеральное удобрение (N<sub>30</sub>P<sub>60</sub>K<sub>90</sub>) усиливало в 1,6 раза накопление органического вещества и симбиотического азота только у клевера; у козлятника и люцерны изменения незначительны. У козлятника азотфиксирующая способность возрастала по годам (от первого к пятому), тогда как люцерна фиксировала азот стабильно по годам.

Таблица 3.2.4.6 – Потребление азота и урожайность травосмеси многолетних трав в зависимости от условий питания (Эседулаев, Шмелева, 2016)

Состав травосмеси, %	Потребление азота, кг/га				Урожайность зеленой массы, т/га	
	общего		симбиотического		контроль	N <sub>30</sub> P <sub>60</sub> K <sub>90</sub>
	контроль	N <sub>30</sub> P <sub>60</sub> K <sub>90</sub>	контроль	N <sub>30</sub> P <sub>60</sub> K <sub>90</sub>		
Козлятник 50+клевер 25+тимофеевка 25	146	202	115	155	30,3	34,0
Козлятник 25+клевер 50+тимофеевка 25	180	183	145	144	32,0	36,0
Люцерна 50+клевер 25+тимофеевка 25	195	190	161	148	38,4	40,1
Люцерна 25+клевер 50+тимофеевка 25	166	169	166	132	34,3	43,2

Повышение доли клевера снижало фиксацию азота и потребление общего азота травосмесью козлятника на фоне N<sub>30</sub>P<sub>60</sub>K<sub>90</sub> и увеличивало на фоне без удобрений (табл. 3.2.4.6). Внесение полного минерального удобрения усиливало азотфиксацию травосмеси козлятника (50:25:25) на 35% и не изменялось при другом соотношении (25:50:25). Полное минеральное удобрение снижало азотфиксацию в травосмеси люцерны на 8-20%, тогда как потребление общего азота не изменялось. Повышение доли клевера увеличивало продуктивность травосмеси козлятника и снижало ее в травосмеси люцерны на фоне без удобрений. Полное минеральное удобрение повышало продуктивность травосмеси козлятника на 12–13%, а травосмеси люцерны на 5–26% по сравнению с контролем.

Способ внесения минеральных удобрений оказывает влияние на характер трансформации азота в почве, что, в свою очередь, сказывается на его использовании растениями, иммобилизации в почве и образовании газообразных соединений. Продуктивность бобовых растений зависит от способа внесения минеральных удобрений (Фатеев, 1992; Персикова, 2002). В условиях вегетационного опыта (чернозем типичный) при локальном

внесении полного минерального удобрения и отдельно азотных удобрений растения лучше (на 16–22%) использовали азот удобрения; его меньше закреплялось в почве и терялось в газообразной форме (табл. 3.2.4.7). При локальном внесении минеральных удобрений проявилась тенденция повышения продуктивности биомассы гороха по сравнению с разбросным способом их применения в той же дозе.

Таблица 3.2.4.7 – Баланс азота удобрения и продуктивность гороха в зависимости от способа внесения минеральных удобрений (Фатеев, 1992)

Вариант	Баланс $^{15}\text{N}$ удобрения, % от внесенного			Урожай биомассы, г/сосуд
	использовано растениями	закреплено в почве	потери	
NPК разброс	51,3	25,5	23,2	74,7
NPК локально	62,5	21,0	16,5	74,8
N локально, РК разброс	59,4	21,8	18,8	75,2

### 3.2.5 Влияние микроэлементов на процессы фиксации азота бобовыми растениями

Находясь в ничтожно малых количествах (в тысячных долях процента) в бобовых растениях, микроэлементы играют ключевую роль в их жизни, выполняют ряд жизненно важных физиологических функций. Так, в комплексе с белками микроэлементы образуют металлопротеины: геминный комплекс с железом, органический комплекс с витаминами  $\text{B}_2$  и  $\text{B}_{12}$ . Они являются составной частью ряда ферментов: медь в составе полифенолоксидазы и аскорбиноксидазы; цинк – в цитохроме; молибден – в нитратредуктазе и т.д.

Микроэлементы участвуют в реакциях синтеза нуклеиновых кислот, белков и хлорофилла, регулируют проницаемость мембран, влияют на накопление алкалоидов (в люпине), способствуют увеличению массы клубеньков и активизации нитрогеназы, активно влияют на продуктивность и качество урожая бобовых растений.

В почвемикроэлементы находятся в ионном и связанном состоянии. В зависимости от условий произрастания бобовые могут испытывать недостаток меди на торфяниках, молибдена – на кислых почвах (дерново-подзолистые, серые лесные), бора и молибдена – красноземах, марганца – на почвах, имеющих нейтральное значение pH, а также карбонатных и супесчаных. Марганец усиливает подвижность фосфора в почве, а кобальт повышает поступление азота в растения. В свою очередь, повышение уровня минерального азота в почве усиливает поступление в растения меди и цинка. Марганец в почве находится в форме двух-, трех- и четырехвалентных соединений; наибольшей подвижностью отличаются двухвалентные. Содержание подвижного марганца в дерново-подзолистой почве изменяется в пределах 1–7 мг/100 г. Повышенное количество подвижного марганца ядовито для бобовых растений.

Содержание цинка в почве колеблется в пределах 20–120 мг/кг. Более подвижен цинк в кислых почвах. Недостаток элемента испытывают песчаные, супесчаные и гравийные почвы, а также карбонатные.

Содержание кобальта в почве составляет 1–15 мг/кг. Низкое – характерно для песчаных, супесчаных почв и торфяников.

В естественных почвенных условиях получили развитие (до 30% случаев) малоактивные и паразитарные штаммы (Образцов, 2001). Так, паразитический образ жизнедеятельности азотфиксирующих бактерий проявляется при недостатке молибдена и бора в почве. Это обусловлено тем, что процессы потребления минерального азота и азотфиксации катализируют молибденосодержащие ферменты. При недостатке молибдена подавляется синтез леггемоглобина, тогда как при недостатке бора не образуются сосудистые пучки в клубеньках, вследствие чего нарушается развитие бактериоидов. При обильном заселении почвы активными клубеньковыми бактериями обработка семян бобовых растений молибденом и бором может заменить инокуляцию (Золотарев, 2015). Бобовые наиболее интенсивно потребляют марганец, тогда как в минимальном количестве – кобальт (табл. 3.2.5.1). Эспарцет усваивает наибольшее количество марганца, а остальные микроэлементы – люцерна. Бобовые растения потребляют значительное количество бора (40–100 г/га), цинка (60–80 г/га), меди (20–40 г/га) и молибдена (10–80 г/га).

Таблица 3.2.5.1 – Размеры потребления микроэлементов бобовыми растениями, г/га

Растение	Микроэлементы					
	B	Cu	Mn	Zn	Co	Mo
Клевер луговой	41–82	25–30	231–247	64–70	1,0–1,2	14–20
Люцерна	56–97	31–37	238–272	75–84	1,5–2,1	13–75
Эспарцет	44–85	27–30	284–297	70–77	1,1–1,3	12–35

Бор в жизни бобовых характеризуется специфической ролью. При его недостатке в клетках тканей бобовых растений накапливаются фенолы и ауксины, что приводит к нарушению синтеза нуклеиновых кислот и белков. Возрастает проницаемость тонопласта, в результате чего полифенолы проникают в цитоплазму и окисляются до хинонов, которые отравляют растения. При недостатке бора происходит некроз клубеньков, повышается алкалоидность зеленой массы и зерна люпина. При внесении бора (1 кг/га) алкалоидность зерна снижается на 30–40% (Новиков и др., 2002).

Донник испытывает потребность в боре, если в дерново-подзолистой и серой лесной почве содержание его подвижной формы не превышает 0,3 мг/кг (Тужилин и др., 2002). Положительное действие на продуктивность донника оказывает суперфосфат, обогащенный бором (3 ц/га) и внесенный осенью в подкормку. Эффективна предпосевная обработка семян борной кислотой (25–30 г/ц семян).

Бор способствует развитию проводящей системы клевера, обеспечению симбиотической системы энергетическими соединениями и максимальной биологической фиксации азота воздуха (Посыпанов и др., 2007).

На дерново-подзолистых почвах борные удобрения (на фоне  $P_{60}K_{60}$ ) способствовали лучшему развитию (в 2,5 раза) клубеньков на корнях серадел-

лы, растения лучше развивались, образовывалось больше бобов и формировались более крупные семена. Борные удобрения обеспечили прибавку урожая семян – на 1,1 ц/га (табл. 3.2.5.2) и урожая зеленой массы – на 89,3 ц/га.

Таблица 3.2.5.2 – Влияние борных удобрений на урожайность семян сераделлы

Вариант опыта	Урожайность семян, ц/га	Прибавка, ц/га	
		общая	от бора
Контроль (без удобрений)	6,8	-	-
$P_{60}K_{60}$	10,6	3,8	-
$P_{60}K_{60}$ + бор (2 кг/га)	11,7	4,9	1,1

На кислых почвах бор практически не действует на уровень азотфиксации, поскольку находится в подвижной форме; известкование снижает подвижность бора в почве. На известкованных почвах уровень содержания бора повышают внесением борированного суперфосфата.

В жизни бобовых растений кобальт играет важную роль, поскольку обеспечивает развитие клубеньковых бактерий. В растениях кобальт находится в ионной форме (витамин  $B_{12}$ ).  $B_{12}$ -коэнзим производится бактероидами клубеньков и участвует в синтезе метионина. Витамин  $B_{12}$  не синтезируют ни растения, ни животные. Кобальт, также как магний и марганец, активирует фермент гликолиза фосфоглюкомутазу и аргиназу.

Бобовые растения потребляют различное количество кобальта, г/га: фасоль – 0,94; люцерна – 1,14; вика – 1,18; эспарцет – 1,30; бобовые травы – 0,8-1,9.

Замачивание семян люцерны в 0,02%-ном растворе сульфата кобальта усиливало синтез фитоглобина в клубеньках и активность азотфиксации. Это обеспечивало формирование большей массы органов и корней люцерны.

Основная функция марганца в жизни бобовых растений сводится к участию в окислительно-восстановительных процессах, к регуляции активности оксидаз. При недостатке марганца:

- нарушается синтез органического вещества в растениях;
- нарушаются функции ферментной системы, производящей восстановление  $NO_3^-$ , в результате чего идет накопление нитратного азота в тканях;
- падает содержание хлорофилла;
- у гороха развивается большая пятнистость семян.

Медь играет важную роль в азотном обмене бобовых, входя в состав нитратредуктазного комплекса. Необходима для синтеза леггемоглобина и активирует ряд ферментов, участвующих в фиксации молекулярного азота атмосферы.

В соломе гороха и ботве картофеля накапливается меди больше, чем в зерне и клубнях соответственно (табл. 3.2.5.3), тогда как в соломе пшеницы ее меньше, чем в зерне.

С повышением уровня содержания подвижной меди с 0,1 до 99 мг/кг почвы содержание ее в зерне гороха выросло в 1,3 раза, в зерне пшеницы – в 1,2 раза, в клубнях картофеля – в 2,1 раза; в соломе и ботве – в 2,0; 2,1 и 3,3 раза соответственно (Лукин, 2011).

Таблица 3.2.5.3 – Содержание меди в растениях в зависимости от ее количества в почве, мг/кг абс. сух. в-ва (Лукин, 2011)

Растения		МДУ	Содержание подвижных форм меди в почве, мг/кг				
			0,1	7	26	57	99
Горох	зерно	34,8	5,52	6,27	6,78	7,08	7,15
	солома	36,0	6,73	7,32	8,87	11,8	14,84
Картофель	клубни	120	5,5	6,0	7,1	9,0	11,7
	ботва	-	5,9	53,3	100,8	148,2	195,6
Озимая пшеница	зерно	34,8	2,96	3,09	3,21	3,34	3,47
	солома	36,0	1,37	1,48	1,77	2,24	2,88

Важную роль в функционировании бобовых растений играет молибден: служит индуктором биосинтеза ферментов, участвующих в связывании азота; поддерживает структуру нитрогеназы; необходим для синтеза леггемоглобина – белка – переносчика кислорода в клубеньках; участвует в переносе электронов в процессе превращения азота в аммиак. При недостатке молибдена клубеньки приобретают желтый (серый) цвет или не развиваются вовсе, в тканях накапливается  $\text{NO}_3^-$ , нарушается синтез хлорофилла.

Методом электрофореза и изотопной индикации выделены два белка люпина, связывающие  $^{99}\text{Mo}$  (Калакуцкий и др., 1991). Эти белки различаются по прочности связи с молибденом. Белок с большей прочностью связи подвержен протеолитической деградации. Второй белок легко диссоциирует и содержит птерин – предшественник молибденокофактора Мо-ферментов. Поэтому его синтез индуцируется при накоплении молибдена в семенах.

Люпин меньше других бобовых страдает от недостатка молибдена. Высокой эффективностью молибденовые удобрения отличаются при содержании элемента в почве менее 0,3 мг/кг.

Потребность растений в молибдене возрастает при избытке марганца, железа, алюминия. Молибден является важнейшим элементом для роста бобовых и развития свободноживущих бактерий-азотфиксаторов. Наиболее чувствительны к недостатку молибдена люцерна, клевер и другие бобовые. Положительно молибден действует на урожай люпина, гороха, сераделлы. При некорневой подкормке раствором молибдена урожай сена повышается на 35%, а доля клевера в 1,6 раза (табл. 3.2.5.4).

Таблица 3.2.5.4 – Действие молибдена на урожайность и ботанический состав травосмеси

Вариант	Урожайность сена, ц/га	Ботанический состав, %		
		Бобовые	Злаки	Разнотравье
Без молибдена	24,8	27	46	27
Подкормка Мо(150 г/га)	33,4	43	35	22

Замачивание семян в растворе комплексопата молибдена повышает число и массу клубеньков на корнях сои. В засушливый год наиболее эффективным является некорневая подкормка сои комплексопата молибдена: число активных клубеньков повышается на 26–32%. Корневая подкормка молибденом активизирует процессы восстановления и ассимиляции азота,

увеличивает активность нитрогеназы и глутаминсинтетазы растений сои в период бутонизации – цветения. При этом стимулируются процессы формирования и активности клубеньков.

Молибденовые удобрения повышают содержание сырого белка в бобовых культурах: в зерне гороха и сои – на 2,0–4,5%, в сене клевера и люцерны – на 5% (Собачкин, 1990). На дерново-подзолистой супесчаной почве молибденовые удобрения повышали содержание белкового азота в зерне гороха, а также ряда аминокислот (лизин, треонин, метионин, фенилаланин) на 1,4–43,7% (Ковалевич, 1991).

При выращивании вики на дерново-подзолистой почве обработка семян раствором молибдена перед посевом повышала массу зерна на 4 г, а содержание сырого белка в зерне – на 2,1% (табл. 3.2.5.5).

Таблица 3.2.5.5 – Качество зерна вики в зависимости от условий питания растений (Кукреш, 1991)

Вариант	Масса 1000 семян, г	Белок, %
Без удобрений (контроль)	51,4	23,9
P <sub>60</sub> K <sub>90</sub>	52,7	23,0
P <sub>60</sub> K <sub>90</sub> + Mo	55,4	26,0

Цинк играет важную роль в жизни бобовых растений. Он оказывает влияние на скорость окислительно-восстановительных процессов, образование хлорофилла, скорость фотосинтеза, углеводный и белковый обмен.

При недостатке цинка в почве у бобовых растений нарушается фосфорный обмен: замедляется транспорт фосфора из корней в надземные органы и его превращение в органические соединения; происходит накопление фосфора в неорганической форме; снижается включение фосфора в нуклеотиды, липиды и нуклеиновые кислоты. При этом уменьшается количество сахарозы и крахмала, увеличивается содержание органических кислот и неорганических соединений азота (аминокислот и амидов). Недостаток цинка чаще всего проявляется у фасоли и сои. Цинк усиливает транспорт фосфора из корней в надземные органы. Он способствует поглощению корнями меди и бора, однако снижает поступление калия, кадмия, марганца, свинца и железа.

В зерне гороха и пшеницы содержится цинка больше, чем в соломе (табл. 3.2.5.6), тогда как у картофеля его количество выше в ботве.

Таблица 3.2.5.6 – Содержание цинка в растениях в зависимости от его количества в почве, мг/кг абс. сух. в-ва (Лукин, 2011)

Растения		МДУ	Содержание подвижных форм цинка в почве, мг/кг			
			0,3 (фон)	70	130	180
Горох	зерно	58	28,0	34,1	40,1	46,2
	солома	60	16,3	27,9	36,1	40,7
Люцерна	сено	60	24,1	37,5	50,9	64,4
Картофель	клубни	400	16,3	20,2	24,2	28,1
	ботва	-	26,9	60,6	94,2	127,8
Озимая пшеница	зерно	68	24,7	48,8	72,9	96,9
	солома	60	3,1	17,6	32,2	46,8

С повышением уровня содержания цинка в почве усиливается транслокация его в растения: в сене люцерны количество цинка выше МДУ достигло при содержании его подвижных форм в почве на уровне 180 мг/кг, в зерне озимой пшеницы – при 130 мг/кг. При этом количество цинка в сене люцерны увеличивается в 2,7 раза, соломе гороха – в 2,5 раза, в зерне гороха – в 1,6 раза.

Микроэлементы, являясь активными центрами ферментных систем, улучшают защитные функции бобовых растений при стрессовых условиях радиоактивного загрязнения и влияют на потребление ими радионуклидов. Бобовые относятся к культурам, способным к повышенному накоплению радионуклидов (табл. 3.2.5.7). В условиях дерново-подзолистой почвы максимальное количество <sup>137</sup>Cs накапливал люпин (172,3 Бк/кг), что в 2,1–3,2 раза выше, чем в люцерне (82,3 Бк/кг), клевере (76,7 Бк/кг), вике яровой (53,4 Бк/кг). По величине коэффициента накопления некорневая подкормка молибденом, бором и бором с молибденом снижала размер поступления <sup>137</sup>Cs в клевер и люцерну в 1,5–1,7 и 1,4 раза соответственно. При внесении бора и молибдена в почву снижалось в 1,5–1,6 раза поступление <sup>137</sup>Cs в люпин, тогда как при некорневой подкормке – в 1,5–1,8 раза. Микроэлементы не влияли на поступление <sup>137</sup>Cs в растения вика яровой.

Эффективным является применение под бобовые растения не только отдельных микроэлементов, но и их комбинаций. Так, сочетание Мо и Cu повышало содержание незаменимых аминокислот в зерне гороха за счет лизина, валина и метионина (Ковалевич, 1991). Комплекс из В, Мо, Cu и Zn увеличивал количество метионина, лейцина, фенилаланина.

Таблица 3.2.5.7 – Влияние микроудобрений на интенсивность поступления <sup>137</sup>Cs в кормовые бобовые культуры

Варианты	Клевер луговой	Люцерна посевная	Люпин желтый	Вика яровая
N <sub>40</sub> P <sub>60</sub> K <sub>80</sub> -фон	0,12	0,13	0,30	0,09
Фон + В 0,04	0,11	0,11	0,20	0,09
Фон + Мо 0,1	0,08	0,09	0,17	0,07
Фон + Mn 0,05	0,12	0,13	0,31	0,08
Фон + Cu 0,03	0,12	0,12	0,28	0,09
Фон + В 0,04 + Мо 0,1	0,07	0,09	0,19	0,09
Фон + Mn 0.05 + Cu 0.03	0,10	0,11	0,29	0,09
НСР <sub>05</sub>	0,02-0,04	0,02-0,04	0,04-0,06	0,02-0,03

### 3.2.6 Эффективность действия инокуляции на активность бобово-ризобияльного комплекса

Микроорганизмы действуют на растения двойко: непосредственно (азотфиксаторы и продуценты биологически активных соединений) и косвенно (усиление активности микрофлоры ризосферы). По своему дей-

ствию клубеньковые бактерии отличаются рядом признаков: вирулентность, конкурентная способность, активность и специфичность. Именно эти свойства определяют характер их взаимоотношений с растениями. По эффективности действия на урожай бобовых клубеньковые бактерии делят на активные (эффективные), малоактивные и неактивные. При инокуляции бобовых активные штаммы клубеньковых бактерий образуют клубеньки в основном на главном корне. Эти клубеньки окрашены в розовый или красный цвет. Активнее процессы азотфиксации идут в более ярко окрашенных клубеньках. Окраску им придает красящий пигмент, близкий по своей природе к гемоглобину и получивший название «фитоглобин». В процессе азотфиксации фитоглобин выполняет функцию переносчика кислорода.

Оптимизация потенциала бобовых растений путем подбора комлементарных штаммов клубеньковых бактерий позволяет создавать симбиотические системы, повышающие продуктивность агрофитоценозов при одновременном снижении затрат на применение азотных минеральных удобрений, а также антропогенной нагрузки на окружающую среду. В среднем инокуляция повышает продуктивность однолетних бобовых растений на 10–25% (Кожемяков, Тихонович, 1998).

Инокуляция люцерны активной расой (штамм 422а) не влияла на потребление азота удобрения растениями (табл. 3.2.6.1), однако повышала на 49,6% фиксацию атмосферного азота при низком уровне минерального азота и снижала ее на 9% при высоком уровне его в почве (Доросинский и др., 1989).

Таблица 3.2.6.1 – Фиксация азота люцерной неинокулированной (контроль) и инокулированной активной расой (штамм 422а) клубеньковых бактерий, мг/сосуд (Доросинский, 1989)

Норма, N	Вариант	Зеленая масса (1-й укос)		Зеленая масса (2-й укос)		Корни		Фиксировано N <sub>2</sub>
		I	II	I	II	I	II	
0,2 н	Контроль	265,0	42,2	460,5	2,0	490,8	28,1	1137,7
	Шт. 422а	602,0	50,1	500,6	2,0	682,0	25,2	1701,1
1,0 н	Контроль	400,5	304,4	479,7	32,8	619,8	146,5	1101,1
	Шт. 422а	517,2	304,7	394,5	29,7	589,3	153,7	1006,8

Примечание: I – N<sub>общ.</sub>; II – <sup>15</sup>N.

В условиях дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы (Литва) при повышении доз азотных удобрений фиксация азота неинокулированной люцерной снижалась в 2,2 раза, тогда как инокулированной – в 1,8 раза (табл. 3.2.6.2). Инокуляция увеличивала фиксацию азота в 1,8–2,5 раза, повышая долю симбиотического азота в общем его выносе растениями. Таким образом, улучшая условия азотного питания, инокуляция обеспечивала повышение продуктивности люцерны в 1,2–4,9 раза. Наиболее эффективно инокуляция действовала на фоне без применения азотных удобрений (Лаписканс, 2006).

Таблица 3.2.6.2 – Влияние инокуляции на азотфиксацию люцерны в зависимости от доз азотных удобрений (Лапинскас, 2006)

Доза азота, кг/га	Сухое вещество, ц/га				Фиксировано N <sub>2</sub>			
	без инокуляции		инокулированная		без инокуляции		инокулированная	
	надземная масса	корни	надземная масса	корни	кг/га	% от общего	кг/га	% от общего
N <sub>0</sub>	11,7	35,3	57,8	53,4	117	63,0	246	78,2
N <sub>30</sub>	43,8	38,8	59,4	54,8	122	56,8	215	69,9
N <sub>60</sub>	46,5	40,7	57,5	51,7	87	40,4	174	57,7
N <sub>90</sub>	46,5	40,4	55,7	46,4	91	38,9	134	48,4
N <sub>120</sub>	40,8	36,0	59,6	47,5	54	25,4	135	45,9

Комбинированная инокуляция клубеньковыми бактериями *Bradyrhizibium Japonicum* 110 и ризосферной *Pseudomonas fluorescens* 21, а также и эндомикоризным грибом *Glomus mosseae* обеспечивает интенсификацию продукционного процесса у сои (увеличение массы зерна) (Шабаев, Смолин, 2000). Повышение продуктивности растений обеспечивалось усилением поступления биологического, почвенного азота и азота удобрения. Ризосферные псевдомонады усиливают симбиотическую азотфиксацию. Инокуляция семян нитрагином обеспечивала существенное увеличение количества (на 19%) и веса (в 3,2 раза) клубеньков на корнях гороха (табл. 3.2.6.3). Бактеризация семян и применение суперфосфата (60 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га) повышали количество клубеньков, но снижали их вес, то есть они становились мельче.

Таблица 3.2.6.3 – Влияние инокуляции и минеральных удобрений на формирование клубеньков на корнях гороха (Гудинова, 1972)

Вариант	Число клубеньков, шт./растение	Вес клубеньков, мг/растение
Контроль	12–103	18–212
Нитрагин	14–153	55–684
Нитрагин + P <sub>60</sub>	17–187	32–632
Нитрагин + P <sub>60</sub> + Mo	16–155	50–700

Применение инокуляция совместно с фосфорными и молибденовыми удобрениями снижало количество и повышало вес клубеньков, то есть они становились более крупными и активными (Гудинова, 1972). Предпосевная инокуляция семян бобовых растений активными штаммами клубеньковых бактерий оказывает эффективное воздействие на формирование симбиотического комплекса за счет образования клубеньков, увеличения их массы и роста нитрогеназной активности (Донская, 2013). Один из способов повышения продуктивности бобовых – поиск комплементарных пар симбионтов на основе усиления симбиотической деятельности бобово-ризобияльного комплекса (Васильчиков и др., 2015; Науменко и др., 2016; Толмачев, Гайдученко, 2015). Инокуляция семян различными штаммами показала сортовую реакцию сои в условиях темно-серых лесных почв (3.2.6.4).

Таблица 3.2.6.4 – Влияние инокуляции на показатели симбиотической активности сортов сои в фазе конец цветения – начало формирования бобов (Васильчиков, Акулов, 2016)

Вариант	Ланцетная		Зуша		Мезенка	
	шт./рас- тение	мкг N/ч*	шт./рас- тение	мкг N/р/ч	шт./рас- тение	мкг N/ р/ч
Контроль	30	44,9	44	45,3	31	59,3
N <sub>60</sub>	19	27,3	33	36,2	23	28,4
Штамм 634	39	59,2	49	44,9	49	69,1
Штамм 626	36	84,3	49	80,9	47	63,5
Штамм 640	36	73,4	40	82,5	36	72,1
Среднее по сортам	32	46,0	43	58,0	37	58,5

\* мкг N/р/ч – микрограмм азота на растение в час

Наибольшее количество клубеньков сорта сои формировали при инокуляции штаммами 364 и 625. Максимальной нитрогеназной активностью обладали сорта сои при инокуляции семян штаммами 640. В то же время наибольшей урожай семян сорт Зуша (24,5 ц/га) формировал при инокуляции семян штаммом 640, тогда как другие сорта (Ланцетная, Мезенка) – без инокуляции, при внесении только азотных удобрений (60 кг N/га), что свидетельствует о наличии в почве многочисленной популяции спонтанных ризобий сои (Васильчиков, Акулов, 2016). Из испытанных сортов сои наибольший урожай семян был получен у сорта Мезенка (26,5 ц/га); у сорта Зуша – 23,9 ц/га, у Ланцетной – 23,5 ц/га.

На формирование клубеньковых бактерий в почве и на их симбиотическую активность положительно воздействует солома зерновых культур. При внесении соломы количество клубеньковых бактериоидов на корнях сои возросло до 10<sup>5</sup> КОЕ/г почвы (при исходном их количестве 10<sup>3</sup> КОЕ/г почвы) (Лисичкина, Кожевин, 1984). При разложении соломы ее сахара превращаются в глюкозу, которую клубеньковые бактерии используют для дыхания и фиксации атмосферного азота (Звягинцев и др., 1986). Ряд штаммов ризобий имеют гидролитические ферменты, обеспечивающие трансформацию клетчатки в водорастворимые сахара. При разложении сложных углеводов освободившийся углерод клубеньковые бактерии используют в процессах фиксации азота (Norper, Mahadevan, 1997). Инокуляция и малые дозы минерального азота повышали формирование фитомассы клевера на дерново-подзолистой почве. При внесении 1,5 г/кг почвы соломы и N<sub>2</sub> биомасса клевера увеличилась на 12–16% (Лапинскас, Пяулокайте-Матузене, 2010). Высокая доза соломы (3,0 г/кг почвы) усиливала азотфиксацию клевером, тогда как инокуляция и минеральный азот не действовали. По-видимому, солома в высокой дозе эффективно усиливала иммобилизацию азота в почве и интенсифицировала деятельность спонтанных клубеньковых бактерий (Суков, 1975). В варианте без соломы наибольшее количество клубеньков формировалось при инокуляции (табл. 3.2.6.5). Минеральный азот подавляюще действовал на инокулированные растения и положительно – на неинокулированные, то есть на активность спонтанных клубеньковых бактерий. Внесение соломы без последующей инокуляции или подкормки не влияло на формирование клубеньков. Солома, инокуляция и малые дозы азотных удобрений повышали азотфиксацию клевера. Наибольшее количество био-

логического азота (на 38% выше контроля) клевер накапливал при инокуляции и внесении соломы 3 г/кг почвы. При внесении соломы фиксация азота у неинокулированного клевера увеличивалась на 13%. Почвенные микроорганизмы разлагают углеводы соломы злаковых культур (целлюлозы, гемицеллюлоза, лигнин), превращая их в растворимые сахара, которые используют клубеньковые бактерии (Звягинцев и др., 1986).

Высокой нитрогеназной активностью клевер обладал при инокуляции. С повышением дозы азота азотфиксация неинокулированного клевера подавлялась по сравнению с инокулированными растениями. При средней дозе соломы активность нитрогеназы у инокулированных растений повышалась на 41–70% по сравнению с неинокулированными. Активность азотфиксации тесно связана с содержанием сахаров в листьях. Инокуляция и средняя доза соломы стимулировали накопление сахаров в фитомассе клевера.

Таблица 3.2.6.5 – Влияние соломы, стартового азота и инокуляции на образование клубеньков, симбиотическую азотфиксацию и накопление растворимых сахаров в растениях клевера (Лапинскас, Пуялокайте-Магузене, 2010)

Доза азота	Число клубеньков, шт./растение	Фиксировано азота атмосферы, мг N/ сосуд	Содержание биологического азота, % от общего азота	Активность нитрогеназы, мкМ N/г корней/час	Содержание растворимых сахаров в биомассе клевера, мг/сосуд
<i>Без внесения соломы</i>					
неинокулировано					
N <sub>0</sub>	45,0	411	79,5	9,08	406
N <sub>21</sub>	56,8	405	78,6	10,1	615
N <sub>42</sub>	42,0	368	77,1	7,78	467
инокулировано					
N <sub>0</sub>	62,0	496	82,4	16,7	605
N <sub>21</sub>	50,4	531	82,8	14,9	601
N <sub>42</sub>	51,8	455	80,8	8,92	604
<i>Внесение 1,5 г соломы/кг почвы</i>					
неинокулировано					
N <sub>0</sub>	49,5	431	78,0	10,6	401
N <sub>21</sub>	58,8	471	79,6	8,57	690
N <sub>42</sub>	12,8	523	81,5	8,63	717
инокулировано					
N <sub>0</sub>	58,3	551	82,5	14,9	909
N <sub>21</sub>	56,7	564	81,4	17,0	896
N <sub>42</sub>	52,3	520	81,2	18,0	771
<i>Внесение 3,0 г соломы/кг почвы</i>					
не инокулировано					
N <sub>0</sub>	47,1	46	79,8	6,85	578
N <sub>21</sub>	59,0	454	77,3	11,9	653
N <sub>42</sub>	46,9	513	78,0	5,46	713
инокулировано					
N <sub>0</sub>	78,0	568	82,9	11,0	754
N <sub>21</sub>	59,0	480	78,3	9,36	677
N <sub>42</sub>	59,1	421	75,6	8,19	689
HCP <sub>0,5</sub>	7,63	36	5,8	0,79	47

Без инокуляции и без азота содержание сахаров в биомассе снижалось более чем в два раза. Высокая доза соломы (3г/кг почвы) не способствовала накоплению растворимых сахаров в фитомассе.

В условиях дерново-подзолистой супесчаной почвы применение азотного удобрения на различных фонах (РК, РК + солома, РК + навоз) повышало урожай зерна яровой пшеницы на 9–10% (табл. 3.2.6.6). Действие ризоагрина на продуктивность яровой пшеницы зависело от погоды в период вегетации растений. В неблагоприятном году прибавка урожая от инокуляции (по отношению к РК фону) оказалась ниже, чем от применения  $N_{30}$ . В более благоприятные годы инокуляция семян ризоагрином (на фоне соломы) влияла на урожай зерна эквивалентно азотному удобрению. В год с достаточным количеством осадков ризоагрин повышал урожай зерна на 14% по сравнению с вариантом РК + солома +  $N_{30}$ . Достоверная прибавка урожая получена так же от инокуляции семян на фоне  $N_{30}$ . Максимальный урожай зерна яровой пшеницы обеспечила инокуляция семян ризоагрином на фоне РК + навоз +  $N_{30}$ .

Растения яровой пшеницы (как инокулированные, так и неинокулированные) использовали одинаковое количество азота удобрения (25–26% от применяемой дозы). Инокуляция семян яровой пшеницы ризоагрином не влияла на размеры усвоения азота соломы озимой ржи (меченной  $^{15}N$ ) – 1,8–2,2% от дозы. Максимальное количество азота атмосферы поступало в благоприятный год на фоне соломы (Завалин, 2005).

Таблица 3.2.6.6 – Действие ризоагрина на урожайность, использование азота удобрения и азотфиксацию при выращивании яровой пшеницы

Вариант		Урожайность зерна, г/м <sup>2</sup>	Использование азота удобрения растениями, % от дозы	Азот атмосферы, г/м <sup>2</sup>
РК	-	221	-	-
	РА	245	-	-
	$^{15}N_{30}$	252	25,4	-
	РА + $^{15}N_{30}$	291	25,9	1,27
РК + солома $^{15}N$	-	258	1,8	-
	$N_{30}$	282	1,9	-
	РА	803	1,8	2,63
	РА + $N_{30}$	334	2,2	0,93
РК + навоз	-	291	-	-
	РА	334	-	-
	РА + $N_{30}$	368	-	-

На средне- и высокоплодородных почвах ризосферные diaзотрофы повышали использование ячменем азота удобрения (более эффективно действовал ризоагрин) (табл. 3.2.6.7). На низкоплодородной почве биопрепараты снижали использование азота удобрения ячменем. Инокуляция семян ячменя снижала иммобилизацию азота удобрения в почве и его газообразные потери. На низкоплодородной почве потери азота удобрения росли под действием биопрепаратов. Ризоагрин и флавобактерин увеличивали использование ячменем азота удобрения на 7–8% сортом Риск и не изменяли его размеров сортом Добрый. Биоплант снижал усвоение азота удобрения сортом Добрый.

Таблица 3.2.6.7 – Баланс азота удобрения (меченного  $^{15}\text{N}$ ) при внесении биопрепаратов под ячмень (Завалин, 2005)

Вариант	Азот удобрения, % от дозы		
	Использовано растениями	Закреплено в почве	Потери
PK + N <sub>30</sub>	26	39	35
PK + N <sub>30</sub> + ризоагрин	47	33	20
PK + N <sub>30</sub> + флавобактерин	42	37	21

Биоплант на обоих сортах повышал газообразные потери азота удобрения (Завалин и др., 1999). Высокая отзывчивость сельскохозяйственных культур на применение биопрепаратов на основе ассоциативных микроорганизмов тесно связана с лучшим использованием азота удобрения и азота почвы (Завалин, 2003). Ризоагрин оказывал воздействие на трансформацию сидерата (горчица белая, меченная  $^{15}\text{N}$ ) в дерново-подзолистой почве, использование азота растениями и его иммобилизацию в почве.

Таблица 3.2.6.8 – Потребление азота яровой пшеницей (Алферов, Чернова, 2017)

Вариант	Азот общий, г/м <sup>2</sup>	Азот удобрения		Азот почвы		Ассоциативный азот, г/м <sup>2</sup>
		г/м <sup>2</sup>	% от внесенного	г/м <sup>2</sup>	дополнительный	
P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> -фон	5,7	-	-	5,7	-	-
Фон + БМ $^{-15}\text{N}$	9,6	2,9	23,1	6,7	1,0	-
Фон + PA	6,6	-	-	5,7	-	0,9
Фон + БМ + PA	11,3	3,3	26,2	6,7	1,0	1,3

Примечание: БМ  $^{-15}\text{N}$  – биомасса горчицы белой, меченной  $^{15}\text{N}$ ; PA – ризоагрин.

Ризоагрин существенно повышал потребление общего азота яровой пшеницей за счет лучшего использования азота горчицы (на 14%) и азота почвы (на 19%) (табл. 3.2.6.8). При этом доля азота атмосферы достигала 8% от общего количества азота в растениях. При применении ризоагрина на фоне сидерата доля азота, фиксированного микроорганизмами, возрастала до 12% от общего выноса азота (увеличение в 1,4 раза), повышалось содержание азота в зерне на 8–12% по сравнению с контролем.

Ризоагрин улучшал в 1,1 раза использование азота горчицы яровой пшеницей, несколько усиливая иммобилизацию ее азота в почве (табл. 3.2.6.9).

Таблица 3.2.6.9 – Потоки и баланс азота удобрения (горчицы белой, меченной  $^{15}\text{N}$ ) при выращивании яровой пшеницы (Алферов, Чернова, 2017)

Вариант	Использовано растениями	Закреплено в почве	Газообразные потери
Фон + БМ	2,9	6,2	3,5
	23,1	49,0	27,9
Фон + БМ + PA	3,3	6,4	3,0
	26,2	50,2	23,6

Примечание: в числителе – азот удобрения, г/м<sup>2</sup>; в знаменателе – азот удобрения, % от внесенного.

При этом газообразные потери азота горчицы сократились на 14%. Внесение биомассы горчицы повышало устойчивость агрофитоценоза яровой

пшеницы до состояния экологического равновесия (гомеостаза). При инокуляции семян препаратом ассоциативных бактерий отмечалась незначительная тенденция повышения устойчивости агрофитоценоза. Таким образом, инокуляция семян ризоагрином при внесении азотных минеральных удобрений повышала использование азота удобрения растениями и снижала его иммобилизацию в почве, а при внесении органических удобрений (сидерата) увеличивала как потребление, так и иммобилизацию азота удобрения.

### 3.2.7 Роль генотипа в фиксации атмосферного азота

Бактерии рода *Rhizobium* в симбиозе с бобовыми растениями за счет фиксации атмосферного азота и в зависимости от биологических особенностей культуры могут накапливать 100–600 кг/га в год связанного азота. При этом доля влияния генотипа штамма бактерий на интенсивность азотфиксации составляет 24%, генотипа сорта растений – 26%, их взаимодействия – 32% (Сидорова, 1991; Шумный, Сметанин, 1991). В зависимости от генотипа численность клубеньков на корнях бобовых растений может различаться в несколько раз (Тихонович, Проворов, 1998), что имеет важное почвенно-экологическое значение. У бобовых растений активность процессов фиксации азота и продуктивность также зависят от сорта (Прудников, 2011).

Суперклубеньковые мутанты гороха отличались повышенной активностью нитратредуктазы, они содержали большее количество белков в урожае (Назарюк и др., 2009, 2016). Урожай зерна и его качество за счет макросимбионта определяло формирование симбиотического аппарата на корнях. Наибольшее количество клубеньков образовывали мутанты гороха К-301а и К-10а (табл. 3.2.7.1). При этом активность нитрогеназы у мутантов повышалась в 3,8–4,3 раза, а синтез и накопление сухого вещества снижались в 1,3–1,4 раза по сравнению с исходным сортом. Это, по-видимому, связано с функцией гормональной системы, контролирующей популяцию (Сидорова и др., 2003; Hardy et al., 1973).

Таблица 3.2.7.1 – Активность симбиотического аппарата гороха в зависимости от генотипа (Назарюк и др., 2007)

Сорт, мутант	Число клубеньков, шт.	Активность нитрогеназы, ммоль $C_2H_2$ /ч	Сухая биомасса, г	Усвоено азотарастением	
				из почвы и воздуха	доля N воздуха, %
Рондо	47	561	41,8	1153	77
Мутанты:					
К-10а	415	2153	29,9	683	61
К-14а	0	0	13,4	263	0
Рамонский 77	53	315	23,9	548	51
Мутанты:					
К-301а	452	1199	18,7	463	42
К-20а	0	0	11,2	270	0

Супермутанты по накоплению сухого вещества уступали соответствующим сортам: у Рондо – в 2,4–3,1 раза, у Рамонского 77 – в 1,3–2,1 раза. Супермутанты существенно меньше (1,2 и 1,8 раза) потребляли азота почвы. Линии К-562 а лучше использовали азот почвы и больше (на 70%) фиксировали азот атмосферы; меньше всего его фиксировал сорт Рамонский 77. Создание сортов с повышенной азотфиксирующей способностью и высокой устойчивостью к биотическим факторам окружающей среды является одним из важнейших элементов экологически безопасной технологии возделывания бобовых культур. Только сортовое разнообразие учитывает полностью климатические и почвенные условия (факторы) отдельных регионов. Продуктивность и качество урожая различных сортов сои в условиях темно-серых лесных почв определяли погодные условия (табл. 3.2.7.2).

Наибольший урожай зеленой массы и семян в течение ряда лет формировал сорт сои Ланцетная, а по количеству сырого белка в семенах выделялся сорт Красная Меча. В то же время по урожаю семян в первый год вегетации на первое место вышел сорт Мезенка, а по урожаю зеленой массы – Красивая Меча; во второй год – Ланцетная и Красивая Меча, на третий год – Мезенка и Ланцетная соответственно. Потенциальная продуктивность различных сортов реализуется при избыточно влажной, теплой погоде (ГТК 2,0–2,4), при этом формируется наибольший урожай семян (3,54 т/га) и зеленой массы (8,64 т/га), наибольшее количество белка в семенах – 44,0% (Головина, Агаркова, 2017).

Таблица 3.2.7.2 – Урожайность зеленой массы, семян и содержание сырого белка в семенах различных сортов сои (Головина, Агаркова, 2017)

Сорта	Урожайность зеленой массы, т/га		Урожайность семян, т/га		Содержание сырого белка, %	
	колебания	среднее	колебания	среднее	колебания	среднее
Ланцетная	3,56–10,21	6,75	1,89–4,38	2,88	39,4–43,7	41,6
Свапа	4,51–8,13	6,65	2,20–3,82	2,80	39,8–41,0	39,8
Красивая Меча	7,70–8,25	8,01	1,87–3,51	2,56	41,9–44,0	42,8
Зуша	7,27–7,75	7,47	2,00–3,02	2,57	40,5–43,0	42,1
Мезенка	3,66–8,12	5,60	2,40–2,96	2,70	39,2–40,0	39,6

Накопление белка в семенах сои зависело также от метеоусловий в определенный год. Слабая засуха может стимулировать накопление белка в семенах сои, глубокая – подавляет его (в отличие от зерновых злаковых культур) вследствие малого оттока азотсодержащих веществ из листьев и стеблей в семена. Повышенная влажность также снижала содержание белка в семенах различных сортов сои. Однако сорт-лидер (Красивая Меча) по содержанию белка за ряд лет не может первенствовать в отдельные годы. Так, в первый год вегетации на первое место вышел сорт Красивая Меча, на второй – Ланцетная, на третий – Зуша.

В условиях более засушливого периода вегетации (1-й год) наибольший урожай кормовой массы на темно-серой лесной почве формировала люцерна сорта Вега 87 (на 53% выше клевера лугового) (табл. 3.2.7.3). Из сортов эспарцета песчаного наиболее продуктивным оказался сорт Михайловский 5 (на 7% выше клевера лугового). Кострец безостый (сорт Орловский 33)

в этот год формировал урожай ниже клевера лугового. На второй (менее засушливый год) наибольший урожай дал кострец безостый. Среди сортов эспарцета более продуктивным оказался сорт Розовый 95. За два года лучший урожай кормовой массы отмечен у люцерны; сорта эспарцета формировали примерно одинаковый урожай кормовой массы (22,4–24,2 т/га) (Зарьянова и др., 2016).

Таблица 3.2.7.3 – Урожайность кормовой массы (сухое вещество) многолетних трав в зависимости от метеословий года (Зарьянова и др., 2016)

Культура	Сорт	Т/га		
		1-й год	2-й год	Сумма
Клевер луговой	Памяти Лисицина	12,5		
Люцерна изменчивая	Вега 87	19,1	9,7	28,8
Люцерна изменчивая	Превосходная	17,0		
Эспарцет песчаный	СибНИК	13,0	9,4	22,4
Эспарцет песчаный	Михайловский 5	13,4	10,6	24,0
Эспарцет песчаный	Розовый 95	12,6	11,6	24,2
Кострец безостый	Орловский 33	11,9	21,5	33,4

Сорт люцерны Пастбищная (как в чистом, так и в смешанных посевах) максимальный урожай сухого вещества дал в первый шестилетний период при обоих видах укосов – на 6–9% выше по отношению к сорту Вега 87 (табл. 3.2.7.4). В дальнейшем урожай у обоих сортов снижался, однако люцерна Пастбищная формировала больший урожай во второй период по сравнению с сортом Вега 87.

Таблица 3.2.7.4. Урожай сухого вещества сортов люцерны в зависимости от состава агрофитоценоза, т/га (Лазарев и др., 2017)

Культура	Годы			Среднее за 18 лет
	1997-2002	2003-2008	2009-2014	
Люцерна изменчивая, Вега 87, Селена	8,8*	7,0	4,2	6,7
	7,4	4,7	3,9	5,3
Люцерна Вега 87, Селена + злаки	8,8	7,0	3,4	6,4
	6,7	4,0	2,8	4,5
Люцерна изменчивая, Пастбищная 88	9,3	8,3	3,4	7,0
	8,0	5,6	3,1	5,6
Люцерна Пастбищная 88 + злаки	9,6	8,0	3,6	7,1
	7,4	5,8	2,9	5,4

Примечание: в числителе – двухукосное использование; в знаменателе – трехукосное использование.

В третий период (засушливый 2010 год) урожай люцерны снижался: у сорта Селена в 2,1–2,6 раза, у сорта Пастбищная – в 2,7 раза. Оба сорта люцерны как в чистом, так и в смешанных посевах формировали одинаковые урожаи сухого вещества (Лазарев и др., 2017).

Инокуляция семян бобовых растений клубеньковыми бактериями является основой технологии их интродукции в северные районы земледелия (Кожемяков, Тихонович, 1998). Инокуляция вызвана еще и тем, что в почвах Крайнего Севера клубеньковых бактерий нет. Агрофитоценозы Крайнего Севера представлены в основном злаковыми травами, и их продуктивность поддерживается азотными минеральными удобрениями. Однако в этих условиях (пониженные температуры, высокая влажность, низкое плодородие почв) снижается использование азота растениями, повышаются его потери, что ухудшает экологическую обстановку и отрицательно влияет на качество кормов (Евдокимова и др., 1984; Кожемяков, Тихонович, 1998; Ласкин, 2006).

Инокуляция семян штаммом 367a *Rhizobium lupini* позволила усилить процессы азотфиксации, повысить накопление азота в надземной массе и ПКО различных сортов люпина (табл. 3.2.7.5). В начальный период вегетации люпин желтый (Ипатьевский) по темпам роста отставал от узколистных видов, однако к периоду уборки достигал фазы цветения. Именно этот сорт накапливал наибольшее количество биологического азота в биомассе, тогда как в растительных остатках больше азота – у сорта Сидерат. Лучший урожай биомассы формировал сорт Снежить. Инокуляция повышала продуктивность сортов люпина на 44–61%. Наиболее эффективно на инокуляцию реагировал сорт Снежить. Под действием инокуляции в наибольшей степени повышалось содержание сырого белка в биомассе сортов Ипатьевский и Снежить (Ласкин и др., 2010).

Таблица 3.2.7.5 – Урожайность сухой массы и азотфиксация сортов люпина (Ласкин и др., 2010)

Сорт	Инокуляция	Сухая масса, ц/га	Фиксированный азот, кг/га	
			корни	общая
Белозерный	-	19,2	-	-
	+	27,6	31	83
Сидерат 38	-	18,7	-	-
	+	28,6	42	107
Снежить	-	22,6	-	-
	+	36,5	26	115
Ипатьевский	-	20,6	-	-
	+	32,8	35	117

Таким образом, инокуляция посевного материала позволяет повысить продуктивность и улучшить качество урожая различных сортов люпина и снизить экологическую напряженность в северных агроэкосистемах. Сорта люпина помогают создавать экономически эффективные и экологически безопасные технологии выращивания бобовых растений.

Минимальное количество элементов питания сорта клевера потребляли при естественном плодородии светло-каштановой почвы при всех режимах влажности (табл. 3.2.7.6). Максимальное количество элементов питания (азота – 549–635, фосфора – 133–152, калия – 448–508 кг/га) растения клевера потребляли при режиме 80% НВ и применении высоких доз минеральных удобрений ( $N_{160}P_{110}K_{125}$ ). Наибольшее количество элементов питания ус-

ваивали сорта клевера ВИК 84 и Пеликан, формирующие 24–25 т/га сухого вещества. Сорт клевера Наследник потреблял наименьшее количество азота (549 кг/га), фосфора (133 кг/га) и калия (461 кг/га) (Дронова и др., 2012). Усвоив максимальное количество элементов питания (при 80% НВ), максимально высокий урожай (80–101 т/га зеленой массы, или 20–25 т/га сухого вещества) дал сорт клевера ВИК 84 (табл. 3.2.7.7). При наибольшей влажности почвы и внесении высоких доз минеральных удобрений все сорта клевера формировали практически одинаковый (24–26 ц/га) урожай сухой массы. На естественном фоне светло-каштановых почв наибольший урожай зафиксирован у сорта Наследник (8–10 т/га) при всех режимах влажности почвы (Дронова и др., 2012).

Таблица 3.2.7.6 – Потребление элементов питания сортами клевера в условиях орошения в зависимости от доз минеральных удобрений (Дронова и др., 2012)

Предполивная влажность почвы, % НВ	Вариант опыта	ВИК 84			Пеликан			Наследник		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
60	Без удобрений	212	51	170	200	48	160	188	77	160
	НРК <sub>1</sub>	300	72	240	285	68	268	275	69	200
	НРК <sub>2</sub>	437	105	350	400	96	320	419	91	323
	НРК <sub>3</sub>	455	109	364	400	96	320	410	93	348
70	Без удобрений	230	55	184	205	49	164	200	54	161
	НРК <sub>1</sub>	315	76	252	317	176	254	284	70	284
	НРК <sub>2</sub>	475	114	380	446	107	356	402	92	404
	НРК <sub>3</sub>	500	120	400	447	108	358	438	104	405
80	Без удобрений	262	63	210	242	58	194	230	54	211
	НРК <sub>1</sub>	375	90	300	352	85	282	353	82	355
	НРК <sub>2</sub>	505	121	404	462	111	370	432	106	453
	НРК <sub>3</sub>	635	152	508	560	134	448	549	133	461

Табл. 3.2.7.7 – Влияние режима орошения и доз удобрений на урожайность сортов клевера лугового второго года жизни (Дронова и др., 2012)

Предполивная влажность почвы, % НВ	Вариант опыта	Урожайность, т/га		
		Вик 84	Пеликан	Наследник
60	Без удобрений (контроль)	<u>7,0</u> 28,0	<u>6,4</u> 25,5	<u>8,0</u> 32,3
	N <sub>100</sub> P <sub>70</sub> K <sub>75</sub>	<u>9,4</u> 37,8	<u>8,6</u> 34,2	<u>10,0</u> 44,1
	N <sub>130</sub> P <sub>90</sub> K <sub>100</sub>	<u>13,0</u> 52,0	<u>12,5</u> 50,0	<u>14,5</u> 58,2
	N <sub>160</sub> P <sub>110</sub> K125	<u>15,0</u> 60,0	<u>14,1</u> 56,4	<u>14,7</u> 58,8
70	Без удобрений (контроль)	<u>8,5</u> 34,0	<u>7,6</u> 30,5	<u>9,5</u> 38,2
	N <sub>100</sub> P <sub>70</sub> K <sub>75</sub>	<u>11,2</u> 44,8	<u>10,4</u> 41,8	<u>13,8</u> 55,2
	N <sub>130</sub> P <sub>90</sub> K <sub>100</sub>	<u>16,0</u> 64,2	<u>15,1</u> 60,5	<u>18,1</u> 72,5
	N <sub>160</sub> P <sub>110</sub> K125	<u>18,2</u> 73,0	<u>18,1</u> 72,6	<u>20,0</u> 80,0

Предполивная влажность почвы, % НВ	Вариант опыта	Урожайность, т/га		
		Вик 84	Пеликан	Наследник
80	Без удобрений (контроль)	9,7 38,7	9,1 36,6	10,3 41,5
	N <sub>100</sub> P <sub>70</sub> K <sub>75</sub>	14,7 59,0	13,2 55,0	15,6 62,5
	N <sub>130</sub> P <sub>90</sub> K <sub>100</sub>	20,5 82,0	19,1 76,5	21,2 85,0
	N <sub>160</sub> P <sub>110</sub> K125	23,9 95,5	25,4 101,8	25,7 103,0

Примечание. В числителе – сухая, в знаменателе – зеленая масса, т/га.

Надерново-слабоподзолистой почвеминимальное количество азота атмосферы фиксировал сорт клевера Дымковский (105 кг N<sub>2</sub>/га) из-за того, что он формировал мелкие клубеньки в основном на боковых корнях зеленого цвета (табл. 3.2.7.8).

Таблица 3.2.7.8 – Биологическая азотфиксация у бобовых трав (Литвинова, 2011)

Вариант	Вынесено азота с урожаем	Накоплено азота в пожнивных остатках	Накоплено азота корнями	Биологически фиксированный азот (в среднем)	Коэффициент азотфиксации	Урожай сухого вещества, т/га
	кг/га год					
КЛ Смоленская 29	573	34	109	96	0,40	5,48
КЛ Ранний 2	556	30	111	89	0,39	5,50
КЛ Витибчанин	598	33	108	104	0,42	5,50
КЛ Дымковский	504	33	105	71	0,33	4,84
КЛ Марс	649	40	153	138	0,49	6,38
КЛ Янтарный	646	43	132	131	0,48	6,45
КЛ Топаз	627	45	113	119	0,46	5,65
КЛ Стодолищенский	564	43	94	91	0,39	5,69
КЛ Новичок	719	53	136	160	0,53	6,35
КЛ Стодолич	652	50	114	129	0,47	6,25
Люцерна	1153	98	164	329	0,70	9,61
Овсяница луговая	328	18	83	0	-	7,82

Примечание: КЛ – клевер.

Максимальное количество азота фиксировал сорт Новичок (160 кг N<sub>2</sub>/га) с розовоокрашенными клубеньками и высоким содержанием элементов питания. Крупные клубеньки формировали тетраплоидные сорта Марс, Янтарный, Стодолич, хотя количество клубеньков у них ниже, чем у деплоидных сортов. В этих условиях наибольшее количество азота (в том числе биологического) потребляла люцерна посевная, что обеспечило формирование лучшего урожая надземной массы (9,61 т/га). Растительные остатки люцерны также накапливали наибольшее количество азота (98 кг N<sub>2</sub>/га), тогда как ПКО различных сортов клевера всего 30–53 кг N<sub>2</sub>/га.

Использование мутантов гороха позволяет получать кормовую смесь в смешанных посевах с овсом (Назарюк, 2007). Наибольшую продуктивность формировали посевы мутанта гороха К-562 а с овсом, минимальную – овса

с бесклубеньковым мутантом К-20 а. При высоком содержании углерода и азота суперклубеньковый мутант К-562 а можно рекомендовать включать в состав кормовой смеси.

С повышением доз фосфорных и калийных удобрений (на фоне азота) урожай зерна сои сорта Оттава повышался до 25 ц/га зерна, тогда как у сорта Уссурийская 154 достигал максимума (15 ц/га) при дозе РК 60 кг/га, а затем снижался по мере увеличения доз удобрений (Климашевский, 1991). Растения сорта Оттава синтезировали большее количество органического вещества на единицу удобрения по сравнению с сортом Уссурийская 154. Несмотря на быстрое поглощение  $^{14}\text{CO}_2$ , синтез углеводов у сорта Уссурийская 154 ослаблен, поскольку основная часть (фосфотриоз и фосфогексоз) включена в цикл регенерации акцептора: превращение ФГК через ФЭП в четырехуглеродные кислоты (малат, аспаргат) также замедленно.

Повышение адаптивной и средообразующей способности бобовых растений основано на внедрении технологий использования эффективных растительно-микробных симбиотических взаимоотношений (Тихонович, Проворов, 1998; Косолапов, 2010; Трофимов, 2010; Косолапов, Трофимов, 2011). Увеличение их продуктивности тесно связано с формированием сортомикробной системы (с комплементарным для данного сорта штаммом ризобактерий) и повышением ее адаптивной способности.

### 3.2.8 Устойчивость бобовых растений к действию пестицидов

Механизм действия гербицидов на бобовые растения лежит в подавлении функций ядра и митохондрий в клетке, поскольку происходят существенные изменения в синтезе белков и ферментов, нарушение окисления и фосфорилирования, торможение энергообмена в процессе дыхания, снижение активности азотфиксирующего комплекса.

Устойчивый к воздействию гербицидов сорт люпина Белорусский характеризовался повышенным содержанием нуклеиновых кислот по сравнению с сортом Боровлянский (Деева, 1969; Деева, Шелег, 1976). У чувствительного сорта люпина содержание РНК и ДНК уменьшилось до 86% по отношению к контролю, тогда как у Белорусского количество ДНК и РНК вначале возрастало, а затем несколько снижалось.

Под действием гербицидов (2,4-Д, ТХА, далапон) у чувствительного сорта активность РНК-азы падала раньше, чем уменьшалось содержание РНК. У устойчивого сорта люпина активность нуклеаз изменялась слабее. Действие хлорхлинхлорида (ССС) на содержание нуклеиновых кислот в побегах растений люпина аналогично действию 2,4-Д, тогда как далапон подавлял синтез РНК и ДНК сильнее. У чувствительного к гербицидам сорта люпина содержание нуклеиновых кислот снижается значительно сильнее, чем у устойчивого.

Содержание белков в условиях применения гербицидов (2,4-Д, ТХА, далапон) у чувствительного сорта люпина снижается значительно сильнее, чем у толерантного сорта. При воздействии 2,4-Д хуже идет включение  $^{35}\text{S}$  в

белки гороха (Хотянович, Веденева, 1965), а также включение  $^{14}\text{C}$ -лейцина в белки лядвенца (Davis, Linscott, 1985); количество SH-групп в белках чувствительного сорта люпина (Боровлянский) снижалось на 20%, тогда как у толерантного сорта (Белорусский) оставалось на уровне контроля (Деева, 1969). Чувствительный сорт, кроме того, характеризовался более быстрым снижением уровня тиолов в растениях. Устойчивые сорта гороха отличаются высоким темпом метаболических процессов, в том числе активностью дегидрогеназ (Маштаков и др., 1969; Жирмунская, Маркина, 1976).

Под действием ССС у устойчивого сорта люпина содержание  $\alpha$ -кетоглутаровой и пировиноградной кислот возрастало, однако в меньшей степени, чем у чувствительного генотипа (Маштаков и др., 1967; Деева, 1969). Более высокий уровень накопления органических кислот совпадает со снижением количества ряда аминокислот (аспарагиновая, глуталиновая, серин), то есть тех, синтез которых непосредственно связан с этими кетокислотами.

Негативное действие гербицидов дуал и ронстар (образование клубеньков и активность нитрогеназы) проявлялось только в начале вегетации сои (табл. 3.2.8.1). В дальнейшем активность симбиотического комплекса сои приближалась к показателям варианта без применения препаратов. Другие гербициды подавляли развитие клубеньков и активность нитрогеназы на протяжении всего периода вегетации.

Таблица 3.2.8.1. Эффективность симбиоза сои – *R. japonicum* при внесении гербицидов (Каппушев, 1992)

Вариант	Цветение		Образование бобов		Налив бобов	
	масса клубеньков, мг/растение	активность нитрогеназы, мкг N/растение/час	масса клубеньков, мг/растение	активность нитрогеназы, мкг N/растение/час	масса клубеньков, мг/растение	активность нитрогеназы, мкг N/растение/час
Без обработки (контроль)	60	1,22	80	3,65	70	1,69
Ручные прополки	110	4,01	130	4,75	90	3,70
Трефлан 1,5	60	1,20	80	3,70	90	3,66
Стомп 1,5	90	3,56	80	3,65	80	3,33
Дуал 1,0	100	3,68	120	4,59	100	3,56
Дуал 2,0	90	3,63	110	4,51	80	3,36
Вернам 2,0	70	1,66	70	3,54	80	3,49
Ронстар 1,5	100	3,57	120	4,49	90	3,44
Рамрод 6,0	60	1,13	70	3,13	80	3,09

Сорт бобового растения определяет устойчивость к гербицидам, то есть характеризует устойчивость симбиотической системы (табл. 3.2.8.2). Применение трефлана (2 кг/га) существенно повысило урожай зерна сои, хотя и несколько снизило эффективность нитрогенизации. В то же время использование гербицида под сою сорта Высокостебельная привело к существенному снижению эффективности аппарата клубеньковых бактерий. Повышение урожая зерна сои Гибридная под действием трефлана произошло вследствие гибели сорняков и улучшения условий минерального питания растений (Пароменская и др., 1987).

Таблица 3.2.8.2 – Урожайность зерна сортов сои в зависимости от нитрогенизации и применения трефлана, ц/га (Пароменская и др., 1987)

Сорт	Без нитрагина	Нитрогенизация	Прибавка от нитрагина
Без гербицида			
Гибридная – 670			
1-й опыт	14,1	20,5	6,4
2-й опыт	17,3	23,0	5,7
Высокостебельная	22,6	24,8	2,2
Трефлан, 2 кг/га			
Гибридная – 670			
1-й опыт	21,0	26,0	5,0
2-й опыт	25,5	30,4	4,9
Высокостебельная	21,7	22,4	0,7

Степень воздействия загрязняющих экосистему веществ (пестициды, тяжелые металлы, радионуклиды) на клубеньковые бактерии зависит от химизма, продуктов их трансформации в почве и резистентности отдельных штаммов (Круглов, Пароменская, 1986; Черных, Овчаренко, 2002). Различные штаммы *Rhizobium* отличаются устойчивостью к пестицидам (табл. 3.2.8.3). Высокой токсичностью для клубеньков характеризуется гербицид дуал для всех видов бобовых, фундазол – для клубеньков конских бобов; среднюю токсичность проявляют фундазол, 2М-4ХМ и 2,4-Д в отношении клубеньков вики. Нетоксичны оказались прометрин и базагран для клубеньков конских бобов. Не влияют на активность нитрогеназы гербициды далапон, 2,4,5-Т, бенлат, базистин, фундазол (Берестецкий, 1984). Значительной устойчивостью обладает нитрогеназа *Rhizobium* к производным фенолмочевины (монурон, диурон, линурон). ТМТД подавлял нитрогеназную активность, однако в малых дозах стимулировал ее, так же как образование клубеньков.

Таблица 3.2.8.3 – Устойчивость различных видов *Rhizobium* к пестицидам (Круглов, Пароменская, 1986)

Вид	Число чувствительных штаммов, % от общего					
	фундазол	2М-4КМ	2,4-Д	прометрин	дуал	базагран
Rh. Legumina sarum						
Гороха	28,0	28,0	32,0	24,0	89,8	8,2
Вики	37,5	37,5	25,0	10,0	88,0	3,3
Конских бобов	75,0	9,4	9,4	0	100	0

Негативное действие гербицидов на бобово-ризобиальный комплекс тесно связано с реакцией растения-хозяина. Препарат 2,4-Д (меченный  $^{14}\text{C}$ ) передвигается из листьев гороха в корни, поступает в клубеньки и накапливается там (Круглов, Пароменская, 1986). Углерод бобовых цепей 2,4-Д и атразина (алкильных и карбоксильных групп, меченных по  $^{14}\text{C}$ ) включается в органические кислоты в листьях и корнях гороха, что свидетельствует об их участии в цикле трикарбоновых кислот. Под действием гербицида снижается содержание сахаров в тканях растений, нарушаются метаболические процессы азотного обмена. Выявлена более высокая устойчивость к гербицидам у микросимбионта по сравнению с высшим растением. Тем не

менее повышенные дозы гербицидов подавляют формирование клубеньков и блокируют процессы фиксации азота.

Высокой токсичностью для *Rhizobium* обладают фунгициды: гранозан, меркуран, ТМТД, оксикарбоксин, каптан, карпен (додин). Они уничтожают клубеньковые бактерии на семенах бобовых. Чувствительность бактерий к фунгицидам зависит от вида штамма.

Достаточно чувствительны к гербицидам цианобактерии (синезеленые водоросли), обитающие на поверхности почвы (Панкратова и др., 1989). Цианобактерии исчезают из состава микробиоценоза уже через неделю после обработки атразином, монуроном и карботионом.

Под действием гербицидов прежде всего подавляется активность ферментного комплекса нитрогеназы, что ведет к снижению содержания фиксированного азота в растениях (Климашевский, 1991). Это связано с особенностями метаболизма азота, и в первую очередь с процессами фотосинтеза. Гербициды подавляли фотохимические реакции в растениях гороха и сои на 18–26%. Также снижалось поглощение  $^{15}\text{NO}_3^-$  корнями растений – на 32–41%.

В связи с вышеизложенным применение пестицидов требует постоянной комплексной оценки их токсичного действия, поскольку они изменяют структуру микробиоценоза (растет численность актиномицетов и грибов), вызывают увеличение количества фитотоксических веществ и метаболитов растений, оказывающих отравляющий эффект, выраженный сильнее, чем у самих препаратов, а также метаболитов микроорганизмов (Минеев, Ремпе, 1992).

Итак, чувствительные к гербицидам сорта бобовых растений характеризуются быстрым и сильным изменением количества РНК, ДНК и белков, чем устойчивые сорта. Негативное действие гербицидов на бобово-ризобияльный комплекс связано с реакцией растения-хозяина.

Таким образом, при разработке мероприятий по борьбе с сорняками в посевах бобовых культур необходимо учитывать состав и дозу препарата, вид и сорт растения, наличие спонтанных бактерий в почве, активность и вирулентность инокулянта, активность процессов фотосинтеза и интенсивность потребление элементов питания (Круглов, Пароменская, 1986; Пароменская и др., 1987). Поэтому прежде всего необходим скрининг всех пестицидов по действию на бобово-ризобияльный симбиоз, то есть токсичности для клубеньковых бактерий и растения-хозяина, а также негативному влиянию на формирование клубеньков и ферментативного комплекса нитрогеназы.

В связи с этим стратегия применения гербицидов на посевах бобовых растений должна строиться с учетом минимального их воздействия на бобово-ризобияльный аппарат. Применение гербицидов с узким индексом избирательности возможно только при учете природных факторов их детоксикации и минимального действия на процессы симбиотической фиксации азота. Неприемлемо использование препаратов, которые отрицательно сказываются на процессах фотосинтеза, тесно связанных с азотфиксацией. Невозможно применение препарата ДНОК на посевах клевера и люцерны, поскольку динитроортокрезол (действующее начало) подавляет активность клубеньковых бактерий (Круглов, Пароменская, 1986). Учитывая экологическое значение фиксации молекулярного азота, гербициды, оказывающие негативное воздействие на бобово-ризобияльный комплекс, нельзя использовать на посевах бобовых культур.

### 3.2.9 Особенности токсического действия тяжелых металлов на бобовые растения

В основе механизма токсического действия тяжелых металлов (ТМ) на бобовые растения лежит инактивация белков, выполняющих каталитические и регуляторные функции. При высоких концентрациях ТМ изменяются активность и свойства ферментов, нарушаются функции клеточных мембран, поглощение и транспорт неорганических ионов, водный обмен, передвижение органических веществ, фотосинтез, дыхание, фиксация азота. Так, под действием высоких концентраций ряда элементов (Pb, Cd, Cu, Zn) снижалось содержание растворимых сахаров, жира и клетчатки в растениях клевера (Бабкин, Завалин, 1995; Черных, Овчаренко, 2002).

По накоплению ТМ бобовые растения на дерново-подзолистой и черноземной почвах образуют следующие ряды:

кадмий: люпин > вика > клевер;

свинец: люпин > клевер > вика;

цинк: клевер > вика > люпин;

медь: клевер > вика > люпин.

По способности аккумуляции ТМ различными растениями также установлены следующие ряды:

фасоль: Cd > Zn > Ni > Co;

овес: Ni > Cu > Co > Cr > Zn > Mn.

Техногенное загрязнение окружающей среды носит комплексный характер. Происходит не только засоление почвы, но и загрязнение ее тяжелыми металлами. Для защиты растений от воздействия внешних стрессовых факторов разработаны микробиологические методы. С этой целью используют биопрепараты, основу которых составляют микроорганизмы следующих родов: *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Alcaligenes*, *Aeromonas*, *Klebsiella*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Xanthobacter*. Основными преимуществами биоремедиации являются длительность действия и безопасность. Так, инокуляция семян капусты китайской приводит к снижению содержания кадмия в корнях в 1,14 раза, в листьях – в 4 раза (табл. 3.2.9.1).

Таблица 3.2.9.1 – Действие *K.planticola* на содержание кадмия в корнях и листьях капусты китайской в условиях засоления и загрязнения почвы кадмием

Вариант	Содержание Cd, мг/кг сырой массы	
	корни	листья
Cd	5,64	0,25
NaCl + Cd	2,62	0,53
<i>K.planticola</i> + Cd	1,05	0,05
<i>K.planticola</i> + NaCl + Cd	2,29	0,13

По-видимому, микроорганизмы обладают способностью к ингибированию подвижности кадмия, перевода его в недоступную для растений форму (CdS). Поэтому целесообразно применение препаратов с бактериями

*Klebsiella*, обладающих способностью адаптироваться к условиям солевого стресса и загрязнения почвы тяжелыми металлами. Активность азотфиксации является чувствительным индикатором загрязнения и может быть использована в качестве показателя нормирования тяжелых металлов в почве (Бабьева и др., 1980; Умаров и др., 1980; Левин и др., 1989). При загрязнении почвы тяжелыми металлами подавляется активность нитрогеназы, снижается фиксация молекулярного азота; при этом кадмий действует более негативно, чем свинец, медь, цинк (Обухов и др., 1980; Гришина и др., 1984; Евдокимова и др., 1984; Скворцова и др., 1984). Аэротехногенное загрязнение тяжелыми металлами также подавляет процессы азотфиксации.

Широкий диапазон колебаний содержания ТМ в растениях зависит от действия множества факторов. Фоновые уровни ртути в бобовых культурах не превышают 100 мкг/кг; кадмия – колеблются в пределах 0,02–0,35 мг/кг; свинца – 1–15 мг/кг; цинка – 20–125 мг/кг; в частности, меди в клевере – 2,0–29,0 мг/кг; никеля в клевере – 0,2–6,2 мг/кг и в семенах фасоли – 1,1–2,3 мг/кг (Черных и др., 2001).

Тяжелые металлы поступают в растения не только через корни, но и через листовые пластинки (Черных и др., 2001). При этом растворенные ионы ТМ транспортируются прямо в устьица и диффундируют через покровные ткани листьев. Скорость поступления ионов ТМ зависит от толщины кутикулы. По скорости усвоения растениями ТМ образуют в следующий ряд (Алексеев, 1987): Cu>Pb>Zn>Cu>Mn>Fe.

Накопление ТМ в растениях на кислых почвах идет более интенсивными темпами, чем на почвах с нейтральной реакцией среды (табл. 3.2.9.2). Растения, выращенные на дерново-подзолистой слабоокультуренной почве, содержали значительно больше ТМ, чем на дерново-подзолистой хорошоокультуренной и черноземе, при одном и том же уровне загрязнения. Вика и люпин накапливают большее количество ТМ по сравнению с зерновыми культурами (овес, ячмень) при одинаковом уровне загрязнения (Черных и др., 2001).

Таблица 3.2.9.2 – Содержание кадмия и свинца в бобовых растениях в зависимости от их концентрации в почве (Черных и др., 2001)

Доза в почве, мг/кг	Дерново-подзолистая слабоокультуренная		Дерново-подзолистая хорошо окультуренная		Чернозем типичный	
	Вика	Люпин	Вика	Люпин	Вика	Люпин
<i>Кадмий</i>						
0	1,05	0,80	0,80	0,50	0,41	0,21
10	15,80	14,60	13,22	10,13	6,50	8,17
20	35,21	38,33	30,14	30,09	-	-
50	-	-	48,01	50,87	34,04	30,0
100	-	-	-	-	65,86	72,49
<i>Свинец</i>						
0	2,0	1,8	1,8	1,0	1,0	0,7
125	14,8	15,0	6,1	5,8	-	-
250	24,7	20,8	9,6	10,6	-	-
500	52,4	44,6	15,8	14,0	10,0	9,8
1000	-	-	34,0	32,1	19,3	17,6
2000	-	-	-	-	33,8	35,8

Распределение ТМ в растениях тесно связано с наличием ряда барьеров: почва – корень, корень – стебель, стебель – лист, стебель – репродуктивные органы, влияющие на характер поступления ионов (Соколов и др., 2008). Вид растений также влияет на распределение ТМ; кроме того, оно может изменяться в зависимости от условий выращивания. Различным содержанием ТМ отличаются не только виды растений, но и ткани одного и того же органа (табл. 3.2.9.3).

Таблица 3.2.9.3 – Распределение ТМ в плодах гороха посевного (Соколов и др., 2008)

Часть плода	Тяжелые металлы, мг/кг сухого вещества								
	Cu	Mn	Zn	Ni	Co	Cr	Pb	Cd	Fe
Створки	15,0	7,5	0,5	0,1	1,5	0,1	0,5	0,01	30,0
Семя	27,5	17,5	1,0	0,5	2,5	0,1	1,0	0,01	50,0

Одинаковое количество хрома и кадмия содержится в створках и семенах гороха; в 5 раз больше никеля в семенах; в 1,–2,3 раза больше Cu, Zn, Mn, Co, Pb, Fe в семенах, чем в створках.

Для сравнения фитотоксичности ионов различных ТМ используют коэффициент токсичности Кт (Удовенко, 1977). Чем меньше Кт, тем менее токсичен металл для растения. Максимальной фитотоксичностью Zn, Pb, Cd обладают растения при выращивании вики на дерново-подзолистой слабокультуренной почве, то есть токсичность металлов снижается с повышением уровня плодородия почвы (табл. 3.2.9.4).

Таблица 3.2.9.4. Фитотоксичность тяжелых металлов для вики (Черных и др., 2001)

Доза металла в почве, мг/кг	Коэффициент токсичности, 10 <sup>-4</sup>								
	Дерново-подзолистая слабокультуренная			Дерново-подзолистая хорошо окультуренная			Чернозем типичный		
	Zn	Pb	Cd	Zn	Pb	Cd	Zn	Pb	Cd
500/20	340	243	98	0	70	40	0	0	0
1000/50	гибель	гибель	гибель	441	313	658	358	88	315
2000/100	гибель	гибель	гибель	гибель	гибель	гибель	921	172	496

Примечание: в числителе – содержание Zn и Pb; в знаменателе Cd; 0 – нет статистически значимого падения урожая.

Токсическое действие ТМ связывают с нарушением поступления макроэлементов в растения. Процессы взаимодействия химических элементов носят антагонистический или синергетический характер. Так, ряд ТМ (в высоких концентрациях) негативно влияет на поступление и накопление макроэлементов: медь подавляет поступление калия, никель и кадмий тормозят накопление азота, фосфора, калия и кальция; цинк снижает поступление фосфора (Мамилев и др., 1987; Vuitas, Cheh, 1981).

При содержании кадмия в почве до 5 мг/кг, цинка – до 150 мг/кг, свинца – до 125 мг/кг поступление химических элементов в растения вики изменялось незначительно (табл. 3.2.9.5–3.2.9.7). Дальнейшее повышение содержания ТМ в почве нарушало транспорт химических элементов в растения (Черных и др., 2001).

Таблица 3.2.9.5 – Содержание химических элементов в вике (листья, стебель) под действием кадмия, % на сухое вещество (Черных и др., 2001)

Доза внесения Cd в почву, мг/кг	Химические элементы					
	N	P	K	Ca	Mg	Na
<i>Дерново-подзолистая слабокультуренная почва</i>						
0	1,23	0,14	0,44	0,37	0,22	0,42
25	1,25	0,12	0,40	0,39	0,25	0,40
5	1,28	0,10	0,41	0,38	0,21	0,46
10	1,37	0,08	0,40	0,30	0,24	0,44
20	1,44	0,07	0,35	0,25	0,05	0,50
<i>Дерново-подзолистая среднекультуренная почва</i>						
0	1,27	0,14	0,49	0,47	0,25	0,38
10	1,38	0,09	0,50	0,42	0,22	0,40
20	1,41	0,07	0,44	0,38	0,18	0,35
50	1,60	0,07	0,46	0,19	0,14	0,40
<i>Чернозем типичный</i>						
0	1,56	0,18	0,53	0,50	0,30	0,45
10	1,61	0,20	0,55	0,44	0,27	0,44
20	1,73	0,12	0,46	0,22	0,19	0,55
50	1,78	0,03	0,50	0,16	0,13	0,65
100	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02

Таблица 3.2.9.6 – Изменение содержания химических элементов в растениях вика под действием свинца (Черных и др., 2001)

Доза внесения Pb в почву, мг/кг	Химические элементы					
	N	P	K	Ca	Mg	Na
<i>Дерново-подзолистая слабокультуренная почва</i>						
0	1,24	0,12	0,48	0,37	0,21	0,44
125	1,20	0,13	0,43	0,35	0,23	0,42
250	1,31	0,10	0,50	0,36	0,20	0,38
500	1,42	0,08	0,51	0,30	0,21	0,40
<i>Дерново-подзолистая среднекультуренная почва</i>						
0	1,30	0,14	0,53	0,44	0,23	0,40
125	1,32	0,12	0,47	0,43	0,25	0,42
250	1,38	0,11	0,55	0,38	0,23	0,41
500	1,60	0,07	0,43	0,32	0,27	0,45
1000	1,60	0,08	0,41	0,25	0,29	0,40
<i>Чернозем типичный</i>						
0	1,52	0,16	0,49	0,48	0,27	0,43
500	1,45	0,10	0,44	0,42	0,25	0,48
1000	1,56	0,07	0,43	0,30	0,20	0,44
2000	1,73	0,04	0,37	0,24	0,18	0,50
НСП <sub>0,95</sub>	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02

Таблица 3.2.9.7 – Изменение содержания химических элементов в растении вики под действием цинка (Черных и др., 2001)

Доза внесения Zn в почву, мг/кг	Химические элементы					
	N	P	K	Ca	Mg	Na
<i>Дерново-подзолистая слабокультуренная почва</i>						
0	1,13	0,12	0,40	0,30	0,20	0,46
125	1,16	0,14	0,12	0,30	0,20	0,40
250	1,20	0,15	0,41	0,28	0,20	0,46
500	1,13	0,10	0,35	0,23	0,15	0,44
<i>Дерново-подзолистая среднекультуренная почва</i>						
0	1,27	0,15	0,50	0,44	0,28	0,45
250	1,34	0,17	0,53	0,46	0,30	0,43
500	1,32	0,14	0,47	0,32	0,27	0,48
1000	1,42	0,10	0,32	0,22	0,17	0,50
<i>Чернозем типичный</i>						
0	1,50	0,17	0,57	0,50	0,30	0,41
125	1,53	0,15	0,60	0,52	0,27	0,17
250	1,58	0,13	0,53	0,36	0,30	0,43
500	1,58	0,09	0,47	0,30	0,20	0,47
1000	1,67	0,05	0,42	0,28	0,15	0,50
2000	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02

Таблица 3.2.9.8 – Изменение содержания микроэлементов в растениях вики под действием тяжелых металлов на дерново-подзолистой слабокультуренной почве (Черных и др., 2001)

Доза внесения металла в почву, мг/кг	Содержание, мг/кг сухого вещества			
	Mn	Fe	Cu	Zn
<i>Кадмий</i>				
0	127	59	3,8	71,3
2,5	133	64	4,0	68,0
5	120	62	3,6	67,1
10	112	55	3,0	62,0
20	97	44	3,1	55,2
50	-	-	-	-
100	-	-	-	-
<i>Свинец</i>				
0	135	60	4,0	70,2
125	140	63	4,2	68,7
250	133	55	3,8	64,0
500	148	56	4,3	55,7
1000	-	-	-	-
2000	-	-	-	-
<i>Цинк</i>				
0	140	63	3,7	-
125	133	60	3,8	-
250	150	65	3,3	-
500	163	54	2,9	-
1000	-	-	-	-
2000	-	-	-	-
НСР <sub>0,95</sub>	7,0	3,8	0,2	-

Примечание: - означает гибель растений.

При повышении содержания ТМ в почве снижалось накопление фосфора, кальция, магния, меди и железа (табл. 3.2.9.8). При этом проявилось явление антагонизма: между кадмием и P, Ca, Fe, Cu, Zn, Fe; между свинцом и P, Ca, Fe, Cu, Zn; между цинком и P, K, Ca, Mg, Cu, Fe. В то же время при повышении концентрации свинца и цинка в почве увеличивалось содержание марганца и натрия в растениях. Под действием кадмия и цинка в посевах вики снижается содержание железа, что приводит к хлорозу.

Взаимодействие элементов происходит на различных этапах их поступления в растения: поглощения клетками корня, ближнего, дальнего и радиального транспорта, обмена веществ в отдельных органах и тканях. Так, свинец подавляет поглощение и транспорт железа и цинка; свинец и кадмий конкурируют за активные центры в клетке; цинк тормозит поступление магния за счет конкуренции за переносчика (Kannan, Keppel, 1976; Sidhu, Radhawa, 1979). Так, при нарушении процессов поглощения растет содержание марганца под действием цинка и свинца. Снижение поступления кальция происходит вследствие нарушения структуры клеточных мембран (калиевых каналов). Негативное действие ртути объясняется связыванием с атомами серы в аминокислотах; кадмий проявляется сродство к сульфгидрильным группам белков. Кадмий способствует синтезу цистеина и метионина в листьях сои. В тканях растений кадмий концентрируется хлорофиллом. Токсическое действие ТМ связано с нарушением фосфорного обмена (табл. 3.2.9.9). Под действием возрастающих доз ТМ растет доля минерального фосфора на 4–9% в листьях клевера, в результате процессы диссимилиации преобладали над процессами ассимиляции фосфора.

Таблица 3.2.9.9 – Относительное содержание отдельных фракций фосфорных соединений и активность фосфатазы в листьях клевера второго года жизни в фазу бутонизации (Бабкин, Завалин, 1995)

Доза металла в почве, мг/кг	P <sub>общ</sub> , %	P <sub>мин</sub> , %	P <sub>орг</sub> кислоторас-творимый, %	P <sub>орг</sub> кислотонера-створимый, %	Отношение P <sub>орг</sub> и P <sub>мин</sub>	Активность фосфатазы, мг P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> на 1 г в 1 ч
<i>Свинец</i>						
0	100	30	32	38	2,35	2,44
60	100	34	24	42	1,96	2,50
125	100	34	20	46	1,54	2,50
250	100	35	23	45	1,86	2,94
500	100	38	10	52	1,63	3,12
<i>Кадмий</i>						
0	100	27	34	39	2,66	2,38
1	100	27	31	42	2,71	2,30
5	100	28	33	39	2,50	2,99
10	100	27	18	55	2,66	3,09
20	100	31	8	62	2,25	3,20
<i>Медь</i>						
0	100	28	30	42	2,60	2,40
60	100	37	8	55	1,72	3,01
<i>Цинк</i>						
0	100	29	30	40	2,40	2,35
125	100	35	17	48	1,86	3,11

Таблица 3.2.9.10 – Изменение содержания хлорофилла, каротина, аскорбиновой кислоты и нитратов в клевере под действием разных количеств тяжелых металлов (Черных и др., 2001)

Доза внесения металла в почву, мг/кг	Дерново-подзолистая слабокультуренная почва				Дерново-подзолистая хорошокультуренная почва			
	содержание нитратов, мг/кг сырой массы	содержание, мг%			содержание нитратов, мг/кг сырой массы	содержание, мг%		
		хлоро- филла	каро- тина	аскорбино- вой кислоты		хлоро- филла	каро- тина	аскорбино- вой кислоты
<i>Кадмий</i>								
0	24,5	285	4,40	120	32,6	360	5,32	149
1	21,8	248	4,56	117	33,6	322	5,47	153
5	26,4	254	4,21	136	30,8	325	5,80	140
10	40,4	237	3,95	158	36,0	280	5,10	156
20	48,0	211	3,10	100	42,1	282	4,81	145
<i>Свинец</i>								
0	26,0	281	4,23	117	34,6	344	5,20	156
60	19,9	282	4,20	120	42,4	312	5,12	163
125	28,2	229	4,36	115	36,3	310	5,36	158
250	38,4	230	3,80	146	32,4	290	4,90	170
500	36,2	217	3,28	103	40,4	298	5,00	163
<i>Медь</i>								
0	22,8	290	4,27	115	34,0	359	5,47	150
60	-	-	-	-	47,4	412	5,62	146
125	-	-	-	-	53,7	400	5,65	158
250	-	-	-	-	56,2	330	5,12	169
500	-	-	-	-	44,0	305	4,80	184
<i>Цинк</i>								
0	27,0	302	4,13	122	30,6	367	5,28	144
125	43,5	261	2,90	153	40,1	430	5,62	159
250	-	-	-	-	53,7	365	5,17	150
500	-	-	-	-	47,4	327	4,90	173
1000	-	-	-	-	61,7	267	4,49	199
НСР <sub>0,95</sub>	2,4	15	0,51	7,8	3,2	12	0,38	8,4

Примечание: – означает гибель растений.

При загрязнении почв меняется устойчивость бобовых культур к ТМ. Ячмень и овес оказались более устойчивыми к загрязнению Pb, Cd, Zn, Cu, чем вика, люпин и клевер (Черных и др., 2001). Снижение урожая соломы овса на дерново-подзолистой среднекультуренной почве происходило при дозе кадмия 50 мг/кг, тогда как вики и люпина – при 20 мг/кг. Тяжелые металлы, изменяя ход обмена веществ, влияют на формирование качества урожая бобовых культур (табл. 3.2.9.10). Так, по мере повышения дозы кадмия и свинца содержание NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и аскорбиновой кислоты растет, при высоких концентрациях ТМ их количество снижается. При больших дозах ТМ в почве содержание каротина в листьях клевера снижалось. Для оценки качества и безопасности зерна зернобобовых культур установлены нормативы содержания ТМ, мг/кг (СанПин 2.3.2. 560-96): свинец – 0,5; мышьяк – 0,3; кадмий – 0,1; ртуть – 0,02; медь – 10; цинк – 50.

### 3.2.10 Радиационная устойчивость бобовых растений

Бобовые растения благодаря азотфиксации являются важнейшим фактором повышения плодородия почв. Однако в результате радиационных аварий значительные площади сельскохозяйственных угодий оказались загрязнены радионуклидами (наиболее опасными  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ ), вследствие чего и бобовые растения накапливают их значительное количество (Белоус, 1997; Санжарова, Филенко, 2018). В наибольшей степени радионуклидами загрязняется растительность естественных лугов, в наименьшей – посевы зернозлаковых и зернобобовых культур. По степени накопления  $^{137}\text{Cs}$  в продукции сельскохозяйственные культуры располагаются следующий убывающий ряд: пшеница – ячмень – горох – просо – гречиха – фасоль – чумиза – картофель – бобы.

По относительному накоплению радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ) бобовые растения образуют следующий ряд: люпин > вика > горох > соя > бобы, фасоль.

Высоким накоплением радионуклидов отличаются люпин, клевер, чина, чечевица (Лурье, 2007). Бобовые растения существенно различаются по коэффициенту накопления  $^{137}\text{Cs}$ : бобы – 0,26; соя – 0,28; горох – 0,30; вика (зерно) – 0,42; вика (солома) – 0,71; люпин (зерно) – 1,94; люпин (солома) – 1,22.

Радионуклиды могут накапливаться в урожае возделываемых культур в таком количестве, что продукция становится непригодной для использования в пищу человека и на корм животным по нормам радиационной безопасности. Для оценки качества и безопасности зерна зернобобовых культур установлены нормативы содержания радионуклидов (СанПин 2.3.2. 560-96):  $^{137}\text{Cs}$  – 60,  $^{90}\text{Sr}$  – 100 Бк/кг.

Поступление радионуклидов в растения зависит от уровня плодородия почвы (табл. 3.2.10.1). В одинаковых условиях в сене сераделлы накапливалось  $^{137}\text{Cs}$  в 1,3–1,5 раза меньше, чем в зеленой массе люпина. Фосфорные и калийные удобрения снижали содержание  $^{137}\text{Cs}$  в биомассе растений в 1,2–1,4 раза (Белоус, 1997).

Таблица 3.2.10.1 – Влияние уровня плодородия почвы на содержание  $^{137}\text{Cs}$  в бобовых растениях, Бк/кг (Белоус, 1997)

Культура	Содержание гумуса	
	1,82%	1,19%
Люпин, зеленая масса	641	1713
Сераделла, сено	496	1133

Бобовые растения различаются по уровню накопления  $^{137}\text{Cs}$  в зависимости от применяемых удобрений (табл. 3.2.10.2).

Таблица 3.2.10.2 – Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в урожае бобовых растений, Бк/кг (Белоус, 1997)

Вариант	Люпин		Сераделла, зеленая масса
	зерно	зеленая масса	
Без удобрений	1421	305	255
Оптимальные дозы удобрений	568	148	84

Оптимальные дозы удобрений обеспечивали снижение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в зерне люпина в 2,5 раза, в его зеленой массе – в 2,1 раза, в зеленой массе сераделлы в 3 раза. Накопление радионуклидов в урожае бобовых растений зависит от уровня плодородия почвы и применяемых удобрений (табл. 3.2.10.3). На почве с высоким уровнем плодородия  $^{137}\text{Cs}$  в зеленой массе клевера не накапливается выше уровня для зеленого корма (Завалин, 2005).

Таблица 3.2.10.3. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в зеленой массе люпина, Бк/кг сырой массы (Завалин, 2005)

Вариант	Дерново-подзолистая почва	
	высокий уровень плодородия	низкий уровень плодородия
Без удобрений	185	434
$\text{K}_{90}$ ( $\text{K}_{\text{MG}}$ )	110	271
$\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ ( $\text{K}_{\text{X}}$ )	145	336
$\text{P}_{90}\text{K}_{180}$ ( $\text{K}_{\text{MG}}$ )	95	221

На почве с низким уровнем плодородия накопление  $^{137}\text{Cs}$  в биомассе люпина ниже нормативного достигается при внесении калийных удобрений в дозах 90–150 кг  $\text{K}_2\text{O}/\text{га}$ . В наибольшей степени содержание  $^{137}\text{Cs}$  в биомассе люпина снижается при внесении калимагнезии. Эффективность применения удобрений зависит от типа почвы, ее гранулометрического состава (табл. 3.2.10.4).

Таблица 3.2.10.4 – Коэффициент накопления  $^{137}\text{Cs}$  в вегетативной массе люпина (Белоус, 1997)

Вариант	Почвы		
	дерново-подзолистая песчаная	дерново-подзолистая легкосуглинистая	торфяная
$\text{P}_{60}\text{K}_{60}$	1,22	0,42	4,78
$\text{N}_{60-90}\text{P}_{120}\text{K}_{60}$	0,84	0,33	3,65
$\text{N}_{60-90}\text{P}_{60}\text{K}_{120-180}$	0,61	0,22	3,04

Максимальное количество  $^{137}\text{Cs}$  накапливалось в вегетативной массе люпина при выращивании его на торфяной почве. Фосфорные и калийные удобрения в повышенных дозах (120 и 180 кг/га) снижали содержание  $^{137}\text{Cs}$  в люпине на дерново-подзолистой песчаной почве в 1,4–2,0 раза, на дерново-подзолистой легкосуглинистой – в 1,3–1,9 раза, на торфяной – в 1,3–1,6 раза.

Больше всего радионуклидов накапливалось в зеленой массе эспарцета при его выращивании на торфяной почве (табл. 3.2.10.5).  $^{137}\text{Cs}$  отличался минимальными значениями поступления в растения при выращивании эспарцета на дерново-подзолистой супесчаной почве. На торфяной в них больше накапливалось  $^{137}\text{Cs}$ , тогда как на дерново-подзолистой супесчаной –  $^{90}\text{Sr}$  (Щур, 2016).

Таблица 3.2.10.5 – Параметры поступления радионуклидов в зеленую массу эспарцета в зависимости от типа почвы (Щур, 2016)

Вариант	<sup>137</sup> Cs		<sup>90</sup> Sr	
	Удельная активность, Бк/кг	КП, Бк/кБк/м <sup>2</sup>	Удельная активность, Бк/кг	КП, Бк/кБк/м <sup>2</sup>
<i>Торфяная малоомощная почва</i>				
Контроль	1177	2,5	25,3	1,9
P <sub>80</sub> K <sub>140</sub>	494	1,2	24,1	1,7
P <sub>80</sub> K <sub>180</sub>	127	0,4	16,4	1,3
<i>Дерново-подзолистая супесчаная почва</i>				
Контроль	1,34	0,02	63,8	4,5
P <sub>80</sub> K <sub>140</sub>	1,60	0,03	60,2	3,3
P <sub>80</sub> K <sub>180</sub>	0,94	0,02	58,4	3,8

Радионуклиды в большей степени поступали в растения на контрольных вариантах. Минеральные удобрения в дозе P<sub>80</sub>K<sub>180</sub> снижали в 3,9 раза накопление <sup>137</sup>Cs и в 1,5 раза <sup>90</sup>Sr в зеленой массе эспарцета на торфяной почве (в 1,4 и 1,1 раза на дерново-подзолистой супесчаной почве соответственно). Поступление радионуклидов из почвы в растения зависит от кислотности почвенного раствора. Как правило, известкование уменьшает содержание радионуклидов в зеленой массе люпина (табл. 3.2.10.6). Dolomитовая мука почти в 2 раза снижала поступление <sup>137</sup>Cs в люпин. Под действием извести транспорт <sup>137</sup>Cs в растения замедляется в меньшей степени, чем поступление <sup>90</sup>Sr (Белоус, 1997).

Таблица 3.2.10.6 – Влияние известкования на поступление <sup>137</sup>Cs в люпин (Белоус, 1997)

Вариант	Коэффициент накопления	Кратность снижения
P <sub>60</sub> K <sub>90</sub>	0,237	
P <sub>60</sub> K <sub>90</sub> + доломитовая мука	0,124	1,9
P <sub>60</sub> K <sub>90</sub> + известковая мука	0,148	1,6

Наиболее эффективно концентрация радионуклидов в растениях снижается при совместном внесении извести и калийных удобрений (Прищеп, 1994). Уменьшение содержания <sup>137</sup>Cs в люпине продолжается в течение 7–8 лет после известкования. Наиболее эффективно этот процесс идет на 3–4-й год после известкования, а также при применении сочетания ассоциативного инокулянта с ризобияльными (штамм 375а + мизорин) (табл. 3.2.10.7).

Таблица 3.2.10.7 – Влияние биопрепаратов на содержание <sup>137</sup>Cs в зеленой массе люпина (Завалин, 2005)

Вариант	Содержание <sup>137</sup> Cs, Бк/кг абс. сух.в-ва	Коэффициент накопления, К <sub>ц</sub>
Без удобрений – фон	18в7	0,61
Фон + штамм 363а	1656	0,70
Фон + мизорин	2102	0,81
Фон + штамм 375а + мизорин	1604	0,53

Эффективнее оказалось действие штамма 363 а по сравнению со штаммами ассоциативной азотфиксации. При инокуляции семян штаммом

375a + мизорин (на фоне без удобрений) снижалось содержание  $^{137}\text{Cs}$  в зерне люпина. Подбор сортов при выращивании бобовых культур на загрязненных радионуклидами почвах является простым и недорогим способом получения экологически безопасной продукции (табл. 3.2.10.8).

Таблица 3.2.10.8 – Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в зеленой массе сортов люпина узколистного (Белоус, 1997)

Сорт	Содержание $^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг
Гелена	1106
Селена	1099
ВДС	1084
Мирган	832
Тимирязевский-2	625
Северный-3	581
Тимирязевский-3	514

Межвидовые различия накопления радионуклидов в урожае бобовых культур достигают 2–5 раз, тогда как сортовые у люпина узколистного – 2,2 раза (Белоус, 1997). Сорта люпина Северный-3 и Тимирязевский-3 отличаются низким уровнем содержания  $^{137}\text{Cs}$ , а сорта Гелена, Селена и ВДС – повышенным (1084–1106 Бк/кг).

Таким образом, улучшение плодородия почвы (применение удобрений, известкование) является эффективным путем снижения содержания радионуклидов в урожае бобовых культур и получения экологически безопасной продукции.

### 3.2.11 Газоустойчивость бобовых растений

В результате жизнедеятельности человека (промышленность, добыча полезных ископаемых, транспорт) в воздух выделяется более 200 различных соединений (Полевой, 1989). К ним относятся газообразные вещества: сернистый газ, окислы азота, хлор, аммиак, угарный газ, фтористый водород и окислы азота ( $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ). Наряду с другими загрязнителями воздуха ( $\text{HF}$ ,  $\text{SO}_2$ ) они являются компонентами фотохимического смога.

Газоустойчивость растений классифицируется как: биологическая (возраст, фаза развития, видовая принадлежность, эколого-географическое происхождение, экологическая пластичность); анатомо-морфологическая (кутикула, восковые покровы, опушения, мелкие устьица, ксероморфность); физиолого-биохимическая (поддержание буферных свойств цитоплазмы и ее ионного баланса). Так, у устойчивых видов к повышению концентрации сернистого газа степень открытости устьиц уменьшается на 40%, а у чувствительных – на 11% (Новикова, Зотиков, 2015). По биологической устойчивости крестоцветные более устойчивы, чем бобовые. Из бобовых фасоль более устойчива, чем клевер и соя. Из травянистых растений чувствительны к  $\text{SO}_2$  люцерна, люпин, клевер, фасоль, редис, томаты, ячмень, а устойчивы – рапс, лук, кукуруза.

Газовые загрязняющие вещества оказывают специфическое воздействие на бобовые растения. Так, сернистый газ, проникая в мезофилл листа, вызывает фотоокисление хлорофилла, хлороз, изменение pH клеточного сока; нарушается деятельность ферментов, снижается стабильность биокolloидов и мембран, подавляется фотосинтез (световые и темновые реакции) нарушается белковый и углеводный обмен, водный режим. При загрязнении газами в клетках накапливаются свободные радикалы, существенно нарушается общий обмен веществ и энергии в растениях. Газообразные токсиканты действуют как сильнейшие окислители фосфолипидов мембран, в результате чего разрушается их структура.

По степени токсичности для бобовых растений газы располагаются в следующем порядке:  $F_2 > Cl_2 > SO_2 > NO > CO > CO_2$ , а также:  $SO_2 > NH_3 > HCN > H_2S$ .

Токсичные газы негативно воздействуют прежде всего на фотосинтетическую активность; происходит фотоокисление белков, аминокислот и других веществ, что вызывает нарушение роста и развития растений, ведет к их гибели.

При низких концентрациях  $NO_2$  в атмосфере (0,1–0,2 мкл/л) повышается продуктивность фотосинтеза: у сои – на 18%, у фасоли – на 53% (при этом урожайность выросла на 86%, а количество семян в бобе – на 29%) (Кореньков, 1999).

При высоком содержании  $NO_2$  в воздухе (0,5 мкл/л) у сои на 23% снижалась продуктивность фотосинтеза. При совместном действии  $SO_2$  (0–15 млн<sup>-1</sup>) и  $NO_2$  (0,1 млн<sup>-1</sup>) подавлялся фотосинтез у гороха и фасоли, тогда как при раздельном действии газов негативный эффект отсутствовал. При совместном действии  $SO_2$  и  $NO_2$  снижается интенсивность фотосинтеза из-за нарушения мембран хлоропластов, происходит разрушение хлорофилла А и каротина.

В процессе аммонификации органического вещества и дезаминирования образуется свободный аммиак. В возрасте 50 дней травостой клевера поглощает 65 кг  $NH_4$ /га аммиака из атмосферы (Шатилов и др., 1988).

Среди луговых трав низкой устойчивостью к диоксиду серы отличается клевер, а высокой – овсяница луговая. Одно и то же растение может быть устойчивым к одному и неустойчивым к другому газу: фасоль, например, относительно устойчива к HF и чувствительна к оксидам азота (Новикова, Зотиков, 2015). Ряд бобовых могут служить биоиндикаторами загрязнения воздуха: горох, люцерна и клевер – диоксидом серы, а фасоль – хлористым водородом.

Отрицательное действие фтора на метаболизм бобовых растений связано с аэротехногенными выбросами. Проникая через устьица, фтористый водород способствует повышению содержания фтора в тканях, нарушает процессы фосфорного и азотного обмена, процессов фотосинтеза и дыхания (Помазкина и др., 2004).

При поступлении фтора в растения гороха он распределяется неравномерно, в следующей последовательности по мере уменьшения: корни, старые листья, стебли, молодые листья, зерно. При аэрогенном загрязнении фтор накапливается в старых листьях гороха. Большее количество фтора горох накапливает на кислых и легких супесчаных почвах. При содержании

фтора в листьях на уровне 20 мг/кг снижаются рост и продуктивность растений. Усиление развития гороха под влиянием фтора (10 и 50 мг/кг почвы) в условиях лугово-черноземной оподзоленной легкосуглинистой почвы сопровождалось улучшением дыхания и усвоения сахаров корнями, снижением водоудерживающей силы листьев. Токсическое действие фтора на горах проявлялось в подавлении поглотительной деятельности корней, снижении активности энлазы, фосфоглюкомутазы и кислой фосфатазы, уменьшении синтеза хлорофилла. Установлено, что растения, устойчивые к засухе, засолению и другим подобным воздействиям, имеют более высокую газоустойчивость, по-видимому, благодаря способности регулировать водный режим и ионный состав. Устойчивость к вредным газам усиливается при улучшении минерального питания растений и известковании кислых почв. Повышенное содержание  $\text{CO}_2$  в несколько раз снижает повреждаемость растений сернистым ангидридом и окислами азота, что может найти практическое применение на органической территории.

Итак, бобовые растения обладают сложным механизмом устойчивости к токсичным газам. Бобовые растения более чувствительны к  $\text{SO}_2$  по сравнению со злаковыми культурами. Токсичные газы обладают комплексным действием на растения, затрагивая белковый и фосфорный обмен, подавляют процессы фотосинтеза и дыхания. Бинарные смеси токсичных газов нарушают структуру клеточных структур. Одно и то же растение может быть устойчивым к одному и неустойчивым к другому газу.

Бобовые – биоиндикаторы загрязнения окружающей среды. Важным фактором повышения газоустойчивости является оптимизация минерального питания бобовых растений и известкование кислых почв.

### **3.2.12 Действие эрозии почв на азотфиксацию бобовых растений**

Водная эрозия затрагивает процессы трансформации азота, изменяет интенсивность процессов его круговорота. Для почв склонов характерны не только газообразные потери азота, но и его потери в результате поверхностного твердого и жидкого стоков, что ведет к снижению плодородия эродированных почв и падению продуктивности возделываемых культур. Исследованиям круговорота азота с применением стабильного изотопа  $^{15}\text{N}$  в условиях эрозионного агроландшафта исполнилось всего более двух десятков лет (Шмырева, 1996; Явтушенко и др., 1995). Они в основном касались миграции и баланса азота удобрений. Что касается азота почвы и симбиотического азота, то их потоки в системе почва – растения оставались до настоящего времени неизученными (Соколов, Шмырева, 2009; Соколов и др., 2010; Шмырева, Соколов, 2009).

Наибольшее количество азота удобрений, азота почвы и атмосферного азота многолетние травы (клевер, тимофеевка) потребляли на приводораздельной части склона, наименьшее – по тальвегу (табл. 3.2.12.1). Азотное удобрение способствовало дополнительной минерализации почвенного

азота, которая снижалась от верхней части склона (7–8%) к нижней части (4–5% от общего его выноса). Локализация азотного удобрения обеспечивала повышение потребления азота растениями за счет большего его использования из удобрения (в 2,0–2,3 раза), азота почвы (в 1,3–1,4 раза) и азота атмосферы (в 1,6–1,9 раза) по сравнению с разбросной технологией внесения. Наличие бобового компонента (клевера) в травосмеси способствует лучшему потреблению азота удобрений по сравнению с травостоем, состоящим из злакового компонента (тимофеевки). Большее потребление атмосферного азота при локальном внесении азотных удобрений обеспечивали оба компонента травостоя (клевер и тимофеевка) на всех элементах склона. При внесении азотного удобрения (60 кг/га) многолетние травы 1-го года пользования усваивали большее количество атмосферного азота на склоне по сравнению с водоразделом. На фоне  $P_{80}K_{80}$  травы потребляли одинаковое количество атмосферного азота как при отвальной, так и при плоскорезной обработке почвы на водоразделе и на склоне (Явтушенко и др., 2006). Внесение возрастающих доз азотных удобрений (30–90 кг/га) снижало азотфиксацию травами как на водоразделе, так и на склоне северной и южной экспозиций (Быстров, Шмырева, 2002).

Таблица 3.2.12.1 – Потребление азота удобрения, азота почвы и симбиотического азота многолетними бобово-злаковыми травами в зависимости от элемента склона и способа внесения азотного удобрения

Вариант	Общий вынос азота, г/м <sup>2</sup>	В том числе N		Экстра-N %	Симбиотический N	
		удобрение, %	почва %		г/м <sup>2</sup>	%
<i>Приводораздельная часть склона, 2–3<sup>0</sup></i>						
$P_{30}K_{30}$ -фон	7,10		26		5,27	74
Фон + <sup>15</sup> N <sub>30</sub> , разброс	8,49	8	29	8	5,34	63
Фон + <sup>15</sup> N <sub>30</sub> , локально	14,15	10	24	7	9,94	66
<i>Средняя часть склона, 3–5<sup>0</sup></i>						
$P_{30}K_{30}$ -фон	5,10		28		3,63	72
Фон + <sup>15</sup> N <sub>30</sub> , разброс	6,26	9	26	5	4,07	65
Фон + <sup>15</sup> N <sub>30</sub> , локально	10,08	13	21	6	6,63	64
<i>Нижняя часть, 5–7<sup>0</sup></i>						
$P_{30}K_{30}$ -фон	3,90		25		2,93	75
Фон + <sup>15</sup> N <sub>30</sub> , разброс	4,74	10	26	4	3,03	64
Фон + <sup>15</sup> N <sub>30</sub> , локально	7,00	14	17	5	4,85	69

При внесении азотного удобрения (30 кг/га) возрастает азотфиксация травами в абсолютных величинах, тогда как доля симбиотического азота в общем выносе снижается с 72–75% на контроле до 63–69% под действием азотных туков.

В условиях эрозийного агроландшафта многолетние бобово-злаковые травы лучше использовали азот удобрений (% от внесенного) по сравнению с зерновыми культурами на всех элементах склона (табл. 3.2.12.2). Многолетние злаковые травы усваивали меньшее количество азота удобрений при их выращивании на смытой дерново-подзолистой почве. Многолетние бобово-злаковые травы лучше использовали азот удобрений на склоне юго-восточной экспозиции при отвальной вспашке и хуже – при плоскорез-

ной обработке дерново-подзолистой почве по сравнению с водораздельным (Явтушенко и др., 2005). Многолетние бобово-злаковые травы первого года пользования использовали примерно одинаковое количество азота удобрений (25–33%) как на водоразделе, так и на склоне (21–39%). Травы накапливали большее количество азота удобрений с глубины 60 см (16–25%) на склоне по сравнению с водоразделом (10–17%).

Использование азота удобрений зерновыми культурами и многолетними бобово-злаковыми травами снижалось от водораздела к нижней части склона. При локальном внесении азотного удобрения зерновые культуры в 2–2,2 раза, а травы в 2,1–2,3 раза лучше усваивали азот удобрений по сравнению с разбросными способами их применения на всех элементах склона.

Таблица 3.2.12.2 – Поток и баланс азота удобрения при выращивании зерновых культур и многолетних трав на различных элементах склона в зависимости от способа внесения азотного удобрения

Вариант опыта	Использовано растениями			Иммобилизовано в 0–100 см слое почвы			Потери		
	1*	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>Зерновые культуры</i>									
<sup>15</sup> N <sub>30</sub> , разброс	<u>0,75**</u> 15	<u>0,56</u> 11	<u>0,49</u> 10	<u>1,42</u> 28	<u>1,25</u> 25	<u>0,84</u> 17	<u>2,83</u> 57	<u>3,19</u> 63	<u>3,67</u> 73
<sup>15</sup> N <sub>30</sub> , локально	<u>1,48</u> 30	<u>1,19</u> 24	<u>0,98</u> 19	<u>1,94</u> 39	<u>1,60</u> 32	<u>1,35</u> 27	<u>1,58</u> 31	<u>2,21</u> 44	<u>2,68</u> 54
<i>Многолетние бобово-злаковые травы</i>									
<sup>15</sup> N <sub>30</sub> , разброс	<u>0,67</u> 22	<u>0,58</u> 19	<u>0,45</u> 15	<u>1,19</u> 40	<u>1,12</u> 37	<u>0,93</u> 31	<u>1,14</u> 38	<u>1,30</u> 44	<u>1,62</u> 54
<sup>15</sup> N <sub>30</sub> , локально	<u>1,43</u> 48	<u>1,32</u> 44	<u>0,95</u> 32	<u>1,20</u> 40	<u>1,25</u> 42	<u>1,06</u> 35	<u>0,37</u> 12	<u>0,43</u> 14	<u>0,99</u> 33

Примечание: 1 – приводораздельная часть склона; 2 – средняя; 3 – нижняя. В числителе – г/м<sup>2</sup>; в знаменателе – % от внесенного азота удобрений.

С экологической точки зрения важными статьями баланса азота удобрений в агрофитоценозе являются его иммобилизация в почве и газообразные потери. В условиях склона при выращивании зерновых культур в 100-сантиметровом слое почвы закрепляется 17–39% азота удобрений (% от внесенного), при выращивании многолетних бобово-злаковых трав – 31–42% при разбросном способе внесения азотного удобрения. При локальном внесении азотного удобрения под зерновыми культурами в почве закрепляется в 1,3–1,6 раза, под травами – в 1,1 раза больше по сравнению с разбросным способом применения.

Потери азота удобрений возрастают от верхней к нижней части склона: у зерновых культур – от 31 до 73%, у многолетних бобово-злаковых трав – от 12 до 54% (от применяемой дозы). Потери азота удобрений при выращивании многолетних трав снижались в 1,4–1,7 раза при разбросном способе внесения и в 1,6–3,1 раза – при локальном по сравнению с зерновыми культурами. При локальном внесении азотного удобрения газообразные потери азота снижались: у зерновых культур – в 1,4–1,8 раза, у многолетних трав в 1,6–3,2 раза по сравнению с разбросным способом их применения.

Обращают на себя значительные потери азота удобрений в нижней части склона при разбросном способе внесения азотных удобрений: под зерновыми культурами – 72–75%; под многолетними бобово-злаковыми травами – 50–58% от внесенного количества (Соколов и др., 2009, 2010; Шмырева и др., 2011; Сычев и др., 2012). Это связано прежде всего с изменением температурно-влажностного режима почвы, изменением соотношения функциональных групп микроорганизмов микробиоценоза (Кутузова, 2001).

Таблица 3.2.12.3 – Поток азота почвы при выращивании многолетних бобово-злаковых трав на различных частях склона в зависимости от способа внесения азотного удобрения, г/м<sup>2</sup>

Показатель	Верхняя часть		Средняя часть		Нижняя часть	
	1	2	1	2	1	2
Остаточный минеральный азот	0,26	0,36	0,20	0,32	0,14	0,15
Иммобилизационный азот	4,28	2,83	3,16	2,01	2,60	1,14
Газообразные потери азота	7,02	0,88	3,61	0,71	4,44	1,18
Минерализованный азот	11,37	7,45	8,56	5,17	8,79	3,64
Использованный растениями азот	2,46	3,38	1,61	2,12	1,26	1,18

Примечание: 1 – внесение азотных удобрений разбросным способом; 2 – внесение азотных удобрений локально.

Изменения в системе почва – воздух – растение или в одном из ее компонентов связаны со структурными и функциональными перестройками в агрофитоценозе. В основе этих изменений лежит азотный обмен как внутри компонентов, так и между ними, интегрированный потоками азота удобрения, азота почвы и атмосферного азота, формирующими внутриверхневый (гетеротрофный) и автотрофный цикл. При выращивании многолетних бобово-злаковых трав минерализация азотсодержащих веществ почвы наиболее интенсивно протекала в верхней части склона и постепенно снижалась в нижней (табл. 3.2.12.3).

При этом доля нетто-минерализованного (Н-М) азота (% от общего минерализованного) возрастала от верхней к нижней части склона (Соколов, Шмырева, 2009). Локализация азотных удобрений снижала долю Н-М в средней и нижней части склона. Процессы иммобилизации/реиммобилизации азота почвы наиболее интенсивно протекали на приводораздельной части склона и затем снижались в нижней части склона. При локальном внесении азотного удобрения реммобилизация азота почвы уменьшалась на всех элементах склона.

Особенность многолетних бобово-злаковых трав состоит в том, что благодаря участию в их составе бобового компонента в гетеротрофный и автотрофный циклы азота наряду с азотом удобрений и азота почвы включается атмосферный азот (Соколов, Шмырева, 2009; Соколов и др., 2010). Потребление атмосферного азота травами и его иммобилизация в почве снижались от верхней к нижней части склона, тогда как газообразные потери, наоборот, возрастали (табл. 3.2.12.4). При локальном внесении азотного удобрения потребление атмосферного азота травами повышалось, а его иммобилизация и потери существенно снижались по сравнению с разбросным способом их применения на всех элементах склона.

При этом в структуре потребляемого клевером азота возрастала относительная доля (% от общего потребления азота) азота удобрения и симбиотического азота и снижалась доля азота почвы. В общем выносе азота с урожаем надземной массы клевера доля азота удобрения колебалась в пределах 8–13%, доля азота почвы – 16–30%, а доля симбиотического азота – 62–69%.

Таблица 3.2.12.4 – Потoki симбиотического азота при выращивании многолетних бобово-злаковых трав на различных элементах склона в зависимости от способа внесения азотного удобрения, г/м<sup>2</sup>

Показатель	Верхняя часть		Средняя часть		Нижняя часть	
	1	2	1	2	1	2
Остаточный минеральный азот	0,42	0,52	0,28	0,42	0,16	0,23
Иммобилизационный азот	9,42	7,85	7,98	6,29	6,30	5,10
Газообразные потери азота	9,43	2,45	9,12	2,22	10,80	4,75
Минерализованный азот	23,62	31,08	21,46	15,60	20,31	14,88
Использованный азот растениями	5,34	9,94	4,07	6,63	3,03	4,85

Примечание: 1 – внесение азотных удобрений разбросным способом; 2 – внесение азотных удобрений локально.

Минерализованный (М) за период вегетации растений азот почвы можно рассматривать как «вход» вещества в систему. Нетто-минерализованный азот является «выходом», а «возвратом на выходе» служит реиммобилизованный азот (РИ), идущий на поддержание системы. Устойчивость системы обеспечивается возвратом 50% вещества, при котором система приближается к состоянию экологического равновесия (гомеостазу) (Одум, 1986). Интегральным показателем функционирования агроэкосистем является отношение Н-М:РИ, характеризующее соотношение между потоками азота, направленными в гетеро- и автотрофный циклы. Показатель Н-М:РИ, близкий или равный единице, возможен при рециркуляции примерно 50%. Чем выше значение соотношения Н-М:РИ, тем менее устойчива система. В то же время чем ниже значение отношения РИ:М (циркуляция азота), тем менее устойчива система.

Самоорганизованная смена режимов функционирования агроэкосистем происходит в зависимости от антропогенной нагрузки (удобрения). Для определения степени устойчивости разработаны критерии интегральной оценки режимов функционирования агроэкосистем и уровней воздействия на них (табл. 3.2.12.5).

Таблица 3.2.12.5 – Критерии режимов функционирования агроэкосистем (Помазкина, 1999)

Режим функционирования	Уровень воздействия	Критерии	
		РИ:М, %	Н-М:РИ
Гомеостаз	норма	50±5	0,8:1,2
Стресс	допустимый	45–30	1,2–2,5
Резистентность	предельно допустимый	30–20	2,5–4,2
Адаптационное истощения	критический	20–10	4,2–9,0
Репрессия	недопустимый	<10	>9,0

Наиболее остро проблема управления круговоротом азота стоит в агрофитоценозах, почвы которые подвержены водной эрозии вследствие значительных потерь азота, как в процессе эрозии почвы, так и в результате денитрификации/нитрификации, высокой степени минерализации почвенного азота и низкой степени иммобилизации азота удобрений и реиммобилизации почвенного азота.

При выращивании многолетних бобово-злаковых трав величина рециркуляции азота (РИ:М) оказалась выше в 1,5–1,8 раза при разбросном применении удобрений и в 1,2–1,3 раза при локальном (табл. 3.2.12.6), что обеспечивало большую устойчивость их агрофитоценоза. Рециркуляция азота при выращивании трав снижалась от верхней к нижней части склона. Азотное удобрение, внесенное локально, усиливало рециркуляцию азота в 1,1 раза по сравнению с разбросным способом применением. По показателям циклов азота агрофитоценоз многолетних трав находился на более высоком уровне экологического равновесия (стресс) при допустимом уровне воздействия по сравнению с зерновыми культурами.

Таблица 3.2.12.6 – Показатели интегральной оценки функционирования агрофитоценоза при выращивании сельскохозяйственных культур на различных элементах склона

Элемент склона	Способ внесения азотных удобрений	Зерновые культуры		Многолетние травы	
		РИ:М, %	Н-М:РИ	РИ:М, %	Н-М:РИ
Верхняя часть склона	1	23	3,4	39	1,6
	2	35	1,8	43	1,6
Средняя часть склона	1	24	3,1	37	1,8
	2	32	2,1	40	1,6
Нижняя часть склона	1	17	5,0	31	2,3
	2	26	2,9	34	2,0

Примечание: 1 – внесение азотных удобрений разбросным способом; 2 – внесение азотных удобрений локально.

Таким образом, водная эрозия затрагивает глубинные процессы трансформации азота в почве. В условиях склона на дерново-подзолистой почве при выращивании зерновых культур (озимая рожь, овес, ячмень) и многолетних бобово-злаковых трав (клевер, тимофеевка первого и второго года пользования) усвоение азота удобрений и его закрепление в почве снижается, а газообразные потери возрастают от приводораздельной части к тальвегу. При выращивании многолетних трав больше закрепляется в почве и меньше теряется в газообразной форме азота удобрений по сравнению с зерновыми культурами. Симбиотический азот активно участвует во всех циклах трансформации азота на различных частях склона.

Локальное внесение обеспечивает повышение потребления азота удобрения зерновыми культурами и травами, а также симбиотического азота клевером на всех элементах склона. При этом существенно снижается газообразные потери азота удобрения, азота почвы и симбиотического азота. Локализация удобрения снижала долю нетто – минерализации почвенного азота в средней и нижней части склона.

При выращивании зерновых культур на склоне агрофитоценоз находился в зоне стресса и резистентности (верхняя и средняя часть склона) и в зоне

резистентности и адаптивного истощения (нижняя часть склона). Агрофитоценоз многолетних бобово-злаковых трав был на более высоком уровне экологического равновесия при допустимом уровне воздействия по сравнению с зерновыми культурами. Локализация азотного удобрения повышает экологическую устойчивость агрофитоценоза на всех элементах склона.

Применение органических удобрений (навоз, компосты, солома) способствует улучшению агрономически ценных показателей плодородия почвы. Однако по России в настоящее время их вносится менее 1 т/га пашни. В создавшейся ситуации, когда ресурсное обеспечение хозяйств низкое, а применение навоза является энергозатратным и экологически небезопасным приемом, кардинальное изменение в этом вопросе следует искать по пути биологизации и экологизации земледелия (Прянишникова, 1945; Такунов, 1996; Лыков и др., 2006). Решение проблемы предусматривает расширение посевов и использование культур на зеленое удобрение.

В немногочисленных исследованиях с биомассой различных растений, меченных  $^{15}\text{N}$ , установлены меньшая доступность азота возделываемой культурой, большая иммобилизация азота в почве по сравнению с азотом минеральных удобрений и снижение газообразных потерь азота (Мамченков и др., 1977; Суков, 1977, 1979).

В связи с этим остаются слабоизученными следующие вопросы: сравнительное использование азота различных видов биомассы растений в одинаковых условиях, степень иммобилизации их азота, размеры газообразных потерь азота. Отсутствуют данные о балансе азота органических удобрений в условиях эродированных почв.

Фитомасса сидератов является важным источником обогащения почвы разлагаемым органическим веществом и биофильными элементами. Кроме гумусовоспроизводящей функции фитомассы сидератов служит средообразующей и энергетической основой жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, осуществляющих фиксацию молекулярного азота и минерализационно-иммобилизационные превращения его соединений (Семенов и др., 2002). Поступление с надземной и подземной массой бобовых культур (клевер, люпин) большого количества легкогидролизуемого органического вещества, обогащенного биологическим азотом, позволяет оптимизировать содержание гумуса, улучшает физико-химические свойства почвы, ее биогенность и фитосанитарное состояние (Яговенко и др., 2003; Иванов и др., 2008; Харкевич и др., 2011).

Потребление азота овсом зависело от формы источника азота и степени эродированности почвы (табл. 3.2.12.7). Общее использование азота овсом складывается из накопления его в зерне и соломе. Наибольшее количество азота содержалось и накапливалось в этих частях растения при внесении фитомассы клевера, а наименьшее – при внесении биомассы тимopheевки. Потребление азота овсом при внесении фитомассы люпина занимало промежуточное положение. Общее потребление азота овсом в нижней части склона снижалось при внесении биомассы клевера – в 1,5 раза, люпина – в 1,2 раза, тимopheевки – в 1,3 раза. При подкормке сульфатом аммония потребление азота овсом в нижней части склона снижалось в 1,1–1,2 раза по сравнению с его выращиванием на приводораздельной части склона (Шмырева и др., 2008).

Под действием фитомассы различных трав овес потреблял большее количество не только азота органических удобрений, но и азота почвы на всех элементах склона (табл. 3.2.12.8). Наибольшее количество азота почвы овес усваивал в верхней части склона, наименьшее – в нижней его части: при внесении биомассы клевера – 1,6 раза, биомассы тимофеевки – 1,4 раза и биомассы люпина – в 1,2 раза. Наибольшее количество азота почвы овес потерял при внесении биомассы клевера, наименьшее – биомассы тимофеевки на всех элементах склона. Накопление азота удобрений достигало 24–31% от общего выноса азота с урожаем овса. Овес потреблял наибольшее количество азота фитомассы клевера, наименьшее – азота фитомассы тимофеевки.

Таблица 3.2.12.7 – Потребление азота овсом при внесении фитомассы трав в зависимости от элемента склона

Биомасса, обогащенная <sup>15</sup> N	Зерно			Солома			Общий вынос N, г/м <sup>2</sup>	Доза азота в биомассе трав, г/м <sup>2</sup>
	масса, г/м <sup>2</sup>	N, %	вынос, г/м <sup>2</sup>	масса, г/м <sup>2</sup>	N, %	вынос, г/м <sup>2</sup>		
<i>Верхняя часть склона, 2–3<sup>0</sup></i>								
P <sub>30</sub> K <sub>30</sub> -фон	176,0	0,77	1,36	202,0	0,40	0,80	2,16	
Клевер	384,0	1,08	4,15	453,0	0,54	2,45	6,60	5,02
Люпин	296,0	0,97	2,87	358,0	0,47	1,68	4,55	5,04
Тимофеевка	266,0	0,81	2,15	315,0	0,41	1,29	3,44	5,01
<i>Нижняя часть склона, 5–7<sup>0</sup></i>								
P <sub>30</sub> K <sub>30</sub> -фон	143,0	0,70	1,00	162,0	0,39	0,63	1,63	
Клевер	266,0	1,01	2,70	320,0	0,50	1,60	4,30	5,02
Люпин	233,0	0,95	2,21	311,0	0,47	1,46	3,67	5,04
Тимофеевка	208,0	0,75	1,56	250,0	0,40	1,00	2,56	5,01

Таблица 3.2.12.8 – Потребление азота удобрений и азота почвы овсом в зависимости от источника азота биомассы трав и элемента склона

Биомасса трав, меченная <sup>15</sup> N	Общий вынос азота та, г/м <sup>2</sup>	В том числе азот				Экстра-N		КИАУ, %
		удобрений		почвы		г/м <sup>2</sup>	%	
		г/м <sup>2</sup>	%	г/м <sup>2</sup>	%			
<i>Верхняя часть склона, 2–3<sup>0</sup></i>								
P <sub>30</sub> K <sub>30</sub> -фон	2,16	-	-	2,16	100	-	-	-
Клевер	6,60	1,85	28	4,75	72	2,59	39	36,8
Люпин	4,55	1,40	31	3,15	69	0,95	22	27,8
Тимофеевка	3,44	0,84	24	2,60	76	0,44	13	16,8
<i>Нижняя часть склона, 5–7<sup>0</sup></i>								
P <sub>30</sub> K <sub>30</sub> -фон	1,63	-	-	1,63	100	-	-	-
Клевер	4,30	1,25	29	3,05	71	1,42	33	24,7
Люпин	3,67	1,10	30	2,57	70	1,10	30	21,9
Тимофеевка	2,56	0,69	27	1,87	73	0,24	9	13,8

Условия минерального питания, создаваемые применением органических удобрений, оказывали существенное влияние на продуктивность овса (табл. 3.2.12.9). Наибольший урожай зерна овес формировал при внесении фитомассы клевера, прибавка составила 118% по отношению к фону. Это объясняется большим потреблением растениями не только азота клевера,

но и азота почвы. При этом растения потребляли большее количество экстра-азота (33–39% от общего выноса азота с урожаем). Несколько меньшую продуктивность овес формировал при внесении фитомассы люпина за счет меньшего потребления азота удобрения и азота почвы; экстра-азот составил 22–30% от общего выноса.

Таблица 3.2.12.9 – Продуктивность овса в зависимости от вида органического удобрения и элемента склона

Биомасса, обогащенная $^{15}\text{N}$	Зерно			Солома		
	г/м <sup>2</sup>	прибавка		г/м <sup>2</sup>	прибавка	
		г/м <sup>2</sup>	%		г/м <sup>2</sup>	%
<i>Верхняя часть склона, 2–3<sup>0</sup></i>						
P <sub>50</sub> K <sub>50</sub> – фон	176	-	-	202	-	-
Фон + клевер	384	208	118	453	251	124
Фон + люпин	296	120	68	358	156	77
Фон + тимофеевка	266	90	51	315	113	60
<i>Нижняя часть склона, 5–7<sup>0</sup></i>						
P <sub>50</sub> K <sub>50</sub> -фон	143	-	-	162	158	-
Фон + клевер	266	123	86	320	158	98
Фон + люпин	233	90	63	311	149	92
Фон + тимофеевка	208	65	45	250	88	54

Наименьшую продуктивность овес формировал при внесении фитомассы тимофеевки за счет меньшего потребления азота удобрения и азота почвы. В нижней части склона продуктивность овса существенно снижалась (в 1,3–1,4 раза по сравнению с приводораздельной частью склона). Это происходило по причине снижения потребления азота органических удобрений и азота почвы. Азот удобрений формировал примерно третью часть продуктивности овса.

При внесении органических удобрений в почву происходит разложение фитомассы трав с освобождением минерального азота, который не накапливается, поскольку используется возделываемой культурой, подвергается иммобилизации и теряется в виде газообразных соединений.

В условиях склона на дерново-подзолистой почве баланс азота зависел от вида органического удобрения и элемента рельефа (табл. 3.2.12.10). Наибольшее количество азота удобрения овес использовал при внесении фитомассы клевера, несколько меньше – при внесении фитомассы люпина (в 1,3 раза на приводораздельной части склона и на 1,1 раза – в нижней его части). Минимальное количество азота удобрения овес потреблял при внесении фитомассы тимофеевки (17% – на приводоразделе, 14% – в нижней части склона).

При внесении органических удобрений в почву поступает целый комплекс специфических органических соединений (белки, углеводы, витамины, аминокислоты, жиры, соли), которые оказывают непосредственное действие на трансформацию азота в почве. В исследованиях с применением

стабильного изотопа  $^{15}\text{N}$  установлено, что азот клевера наиболее интенсивно включается в формирование гуминовых кислот, тогда как азот тимофеевки – в накопление фульвокислот дерново-подзолистой почвы (Шмырева, Соколов, 2012). Азот клевера более активно включается в биосинтез микробной биомассы в почве по сравнению с азотом тимофеевки, что обеспечивает накопление большего количества минерального азота (Шмырева и др., 2014). Это, в свою очередь, создает условия большего потребления азота растениями и формирование более высокого урожая.

Таблица 3.2.12.10 – Баланс азота биомассы трав при выращивании овса в зависимости от элемента склона

Источник $^{15}\text{N}$	Доза N, г/м <sup>2</sup>	Использование растениями		Иммобилизация в слое 0-100 см		Потери	
		1	2	1	2	1	2
Клевер	5,02	$\frac{1,85}{37}$	$\frac{1,25}{25}$	$\frac{2,76}{55}$	$\frac{2,51}{50}$	$\frac{0,41}{8}$	$\frac{1,26}{25}$
Люпин	5,04	$\frac{1,40}{28}$	$\frac{1,10}{22}$	$\frac{3,02}{60}$	$\frac{2,62}{52}$	$\frac{0,62}{12}$	$\frac{1,32}{26}$
Тимофеевка	5,01	$\frac{0,84}{17}$	$\frac{0,69}{14}$	$\frac{3,46}{69}$	$\frac{2,96}{59}$	$\frac{0,71}{14}$	$\frac{1,36}{27}$

Примечание: 1 – привдораздельная часть склона, 2–3<sup>0</sup>; 2 – нижняя часть склона, 5–7<sup>0</sup>. В числителе – г/м<sup>2</sup>; в знаменателе – % от внесенного азота.

Иммобилизация азота органических удобрений в дерново-подзолистой почве значительно превышала закрепление азота минеральных удобрений: 50–69% от применяемой дозы по сравнению с 16–40% (Шмырева и др., 2008). Наибольшее количество азота удобрения закреплялось в почве при внесении фитомассы тимофеевки (C:N=27), наименьшее – фитомассы клевера (C:N=19) при внесении на обеих частях склона.

В нижней части склона иммобилизация азота органических удобрений снижалась при внесении фитомассы клевера в 1,1 раза, фитомассы люпина и тимофеевки – в 1,2 раза.

Размеры иммобилизации азота минерального удобрения повышались пропорционально увеличению соотношения C:N в составе совместно применявшихся источников сульфата аммония и биомассы клевера и гороха (Серегин, 2000). Иммобилизация азота органических удобрений в почве усиливается в первые 2–3 недели после внесения биомассы и сопровождается интенсивной минерализацией ее органического вещества (Шмырева и др., 2014). В дальнейшем иммобилизованный азот удобрений частично реминерализуется и потребляется выращиваемой культурой.

Минимальное количество азота (8% от применяемой дозы) органических удобрений терялось при внесении фитомассы клевера в почву привдораздельной части склона, максимальное (14%) – при внесении фитомассы тимофеевки. Газообразные потери азота органических удобрений существенно возрастали при выращивании овса в нижней части склона: при внесении фитомассы клевера более чем в 3 раза, при внесении фитомассы люпина и тимофеевки – в 2 раза, что значительно ниже по сравнению с

применением сульфата аммония (34–74% от применяемой дозы) (Шмырева и др., 2008). При внесении сульфата аммония в дерново-подзолистую почву (Московская обл.) газообразные потери азота достигали 43% и существенно снижались (до 26%) при внесении половинных доз биологического азота (биомасса клевера) и минерального азота (Серегин, 2000). Потери азота фитомассы клевера составляли 20% от внесенного без применения минерального азота и снижались до 8% при совместном внесении с сульфатом аммония.

Таким образом, водная эрозия оказывает существенное влияние на трансформацию органических удобрений в почве, круговорот и баланс азота. В условиях пятипольного севооборота на дерново-подзолистой почве Центрального Нечерноземья наиболее благоприятный баланс азота складывался при внесении биомассы клевера, меченой  $^{15}\text{N}$ . За счет лучшего использования азота почвы и азота биомассы клевера овес формировал наибольший урожай зерна на приводораздельной части склона. В нижней части склона складываются менее благоприятные условия азотного питания овса, что приводило к существенному снижению его продуктивности. Минимальное количество азота органических удобрений овес использовал при внесении биомассы тимopheевки на обеих частях склона. Имобилизация азота органических удобрений в дерново-подзолистой почве зависит от их вида и элемента рельефа. Имобилизация азота органических удобрений значительно превышает закрепление азота минеральных удобрений. Наибольшее количество азота удобрения фиксировалось в почве при внесении фитомассы тимopheевки (C:N=27), наименьшее – фитомассы клевера (C:N=19). В нижней части склона имобилизация азота органических удобрений снижается в 1,1–1,2 раза по сравнению с приводораздельной частью.

Имобилизация азота фитомассы трав имеет важное агроэкологическое значение, поскольку существенно снижает размер его газообразных потерь. Наименьшее количество азота терялось при внесении фитомассы клевера в почву приводораздельной части склона (8% от применяемой дозы) и 25% – в нижней его части. Наибольших потерь азота достигалось при внесении фитомассы тимopheевки (14 и 27% соответственно).

Запас минерального азота в агроэкосистеме зависит от общего количества связанного азота с одной стороны, а с другой – от активности микроорганизмов, участвующих в различных циклах его превращения. Структурные изменения в микробиоценозе влияют на процессы мобилизации и имобилизации азота в почве. Контролирующими факторами накопления микробной биомассы, соотношения в составе микробиоценоза грибов и бактерий, обеспеченности почвы активным органическим веществом являются количество и качество растительных остатков предшествующей культуры (Кутузова и др., 2001; Семенов и др., 2005). Количество минерального азота в почве в основном зависит от оборачиваемости микробной биомассы и минерализационной способности микроорганизмов. В свою очередь, размеры ассимиляции азота органического вещества микроорганизмами зависят от многих факторов и составляют 12–80% от внесенного (Кузнецова и др., 2003).

Таблица 3.2.12.11 – Динамика содержания азота многолетних трав и минеральных удобрений в микробной биомассе неэродированной почвы

Источник $^{15}\text{N}$	$^{15}\text{N}$ фитомассы трав и удобрения	
	Н почвы мг/100г	% от внесения
12 суток		
Клевер	15,9	41,2
Тимофеевка	10,4	11,4
Клевер (70%) + тимофеевка (30%)	11,7	34,7
Сульфат аммония	8,5	28,0
25 суток		
Клевер	16,57	42,2
Тимофеевка	11,44	43,8
Клевер (70%) + тимофеевка (30%)	12,51	36,3
Сульфат аммония	9,43	26,3
50 суток		
Клевер	15,00	37,3
Тимофеевка	10,00	42,5
Клевер (70%) + тимофеевка (30%)	11,07	27,8
Сульфат аммония	8,04	21,1
75 суток		
Клевер	13,00	31,0
Тимофеевка	10,41	40,6
Клевер (70%) + тимофеевка (30%)	10,17	24,9
Сульфат аммония	6,21	16,2

Примечание: азот, внесенный в фитомассе и удобрениях (мг/100 г почвы): клевера – 18,2, тимофеевки – 15,4; 70% клевера + 30% тимофеевки – 16,1; сульфат аммония – 15,0.

В связи с тем что в трансформации азота в почве на различных элементах склона активно участвуют разные группы микроорганизмов важным становится решение задачи определить размеры ассимиляции почвенной микрофлорой и минерализации азота фитомассы многолетних трав (меченых  $^{15}\text{N}$ ) в зависимости от степени эродированности почвы.

Микроорганизмами более энергично использовался их азот по сравнению с сульфатом аммония (табл. 3.2.12.11). Так, в верхней части склона (неэродированная почва) при внесении фитомассы клевера и клевера с тимофеевкой на 12-е сутки микроорганизмы содержали в 1,8–2,0 раза больше общего азота по сравнению с сульфатом аммония ( $\text{N}_a$ ). В нижней части склона (эродированная почва) активность микроорганизмов несколько снижалась: при внесении фитомассы многолетних трав содержание азота в их биомассе повышалось только в 1,4–1,9 раза. На 12-е сутки после ее внесения в почву микроорганизмы содержали одинаковое количество азота по сравнению с  $\text{N}_a$  как в эродированной, так и в неэродированной почве. Однако уже на 25-е сутки – в 1,2–1,4 раза больше (Шмырева и др., 2014).

Максимальное количество азота клевера в биомассу микроорганизмов включалось на 12–25-е сутки, а затем несколько снижалось к концу наблю-

дений (рис. 3.2.12.1). Максимальное количество азота тимфеевки включалось в микробную биомассу на 25-е сутки, а затем также несколько снижалось. При совместном внесении фитомассы клевера с тимфеевкой включение азота в микробную биомассу возрастало по сравнению с фитомассой тимфеевки и снижалось по сравнению с фитомассой клевера. Максимальное количество связанного микроорганизмами  $^{15}\text{N}$  фитомассы многолетних трав достигало на 25-е сутки – 36–44% от внесенного азота. Чем медленнее азот фитомассы тимфеевки ассимилировался микроорганизмами, тем больше его содержалось в микробной биомассе к концу инкубационного периода.

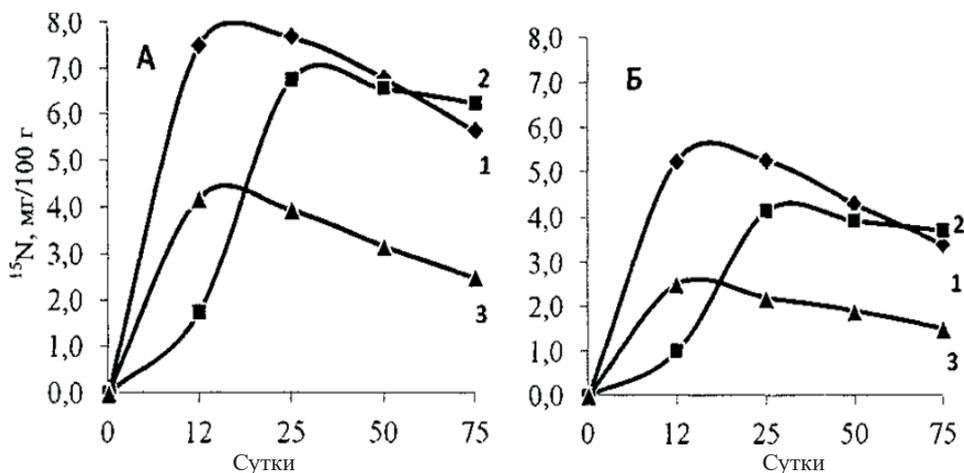


Рисунок 3.2.12.1. Динамика содержания азота фитомассы многолетних трав и минерального удобрения в микробной биомассе незеродированной (А) и эродированной (Б) дерново-подзолистой почвы: 1 – клевер, 2 – тимфеевка, 3 – сульфат аммония (Na).

Эрозия почвы вызывает снижение интенсивности использования азота фитомассы многолетних трав сообществом микроорганизмов, участвующих в трансформации свежеснесенного органического вещества. Обращает на себя внимание тот факт, что при раздельном внесении фитомассы клевера и тимфеевки происходит более сильное замедление включения  $^{15}\text{N}$  в микробную биомассу на 50–75-е сутки (в 1,5 и 1,7 раза соответственно), тогда как при совместном их внесении процесс включения  $^{15}\text{N}$  в микробную биомассу существенно возрастает. При внесении сульфата аммония включение  $^{15}\text{N}$  в биомассу микроорганизмов снижается в эродированной почве в тех же размерах, что и при внесении фитомассы тимфеевки.

Известно, что скорость разложения растительных остатков в почве зависит от соотношения С: N или лигнин :N (Praveen – Kumar et al., 2003). Так, при внесении фитомассы овса и кукурузы (С:N=9–99) в серую лесную почву 4–66% внесенного азота включалось в микробную биомассу (Кузнецова и др., 2003; 2006). При внесении в почву различных органов люцерны (соотношение С:N=8–22) микроорганизмы использовали (накапливали) до 12% внесенного азота (Ladd et al., 1981). Молодые зеленые листья ржи с узким соотношением С: N и содержанием повышенного количества растворимого углерода разлагались быстрее, чем корни злаковых трав (Urguiga et al., 1998).

Однако следует учитывать, что с растительной фитомассой в почву вносятся различные количества углеводов, витаминов, ферментов, элементов питания и других веществ, обеспечивающих как ускорение, так и торможение процессов минерализации азота и его ассимиляцию микроорганизмами. Предполагается, например, что растворимые соединения углерода растительных остатков контролируют быструю стадию их разложения, а лигнин – медленную.

Снижение включения  $^{15}\text{N}$  фитомассы многолетних трав в микробную биомассу и эродированной почве тесно связано со снижением в ней органического вещества (вызванного эрозией) и его доступностью микроорганизмам. Изменение соотношения C:N в почве ведет к смене структуры микробного сообщества и доминирующей экологической стратегии (Звягинцев и др., 1999). Поступление свежего органического вещества (растительные остатки) сопровождается существенным увеличением роста биомассы микроорганизмов (Ambus et al., 1997). По мере истощения запасов доступного углерода биомасса микроорганизмов постепенно снижается. Кроме того, запасы доступного углерода в почве определяют соотношение грибов и бактерий в микробной биомассе, от чего зависит обеспеченность активным органическим веществом (Кузнецова и др., 2006; Семенов и др., 1995; Щапова, 2004; Breland et al., 1997; Lundquist et al., 1999; Благодатская, 2001). Повышение соотношения C:N приводит к существенному увеличению включения  $^{15}\text{N}$  растительных остатков в микробную биомассу различных почв, независимо от вида сельскохозяйственного использования (Кузнецова и др., 2003; Благодатский и др., 1987).

При оценке минерализационной способности азота фитомассы многолетних трав важно знать количество азота, которое теряется в виде газообразных соединений из почвы (рис. 3.2.12.2). При компостировании потери азота связаны с доступностью азота и углерода фитомассы трав, а также с наличием кислорода в почве. Наиболее благоприятные условия для денитрификации складывались при внесении в почву сульфата аммония: потери азота из незэродированной почвы достигали 32%, из эродированной – 42% от применяемой дозы. Минимальное количество азота терялось при внесении фитомассы тимopheевки – 4 и 16% соответственно. При внесении фитомассы многолетних трав из незэродированной почвы терялось азота в 4,6 раза, а из эродированной почвы в 1,7 раза меньше по сравнению с его потерями при внесении сульфата аммония.

Таким образом, эродированность почвы изменяет интенсивность мобилизационно-иммобилизационного цикла азота в почве, связанного с активностью почвенной микрофлоры. При отдельном внесении фитомассы клевера и тимopheевки включение  $^{15}\text{N}$  в микробную биомассу в эродированной почве снижается в 1,5 и 1,7 раза соответственно по сравнению с незэродированной, тогда как при совместном внесении их фитомассы – в 1,2 раза. При внесении сульфата аммония включение  $^{15}\text{N}$  в биомассу микроорганизмов снижается в эродированной почве в тех же размерах, что и при внесении фитомассы тимopheевки.

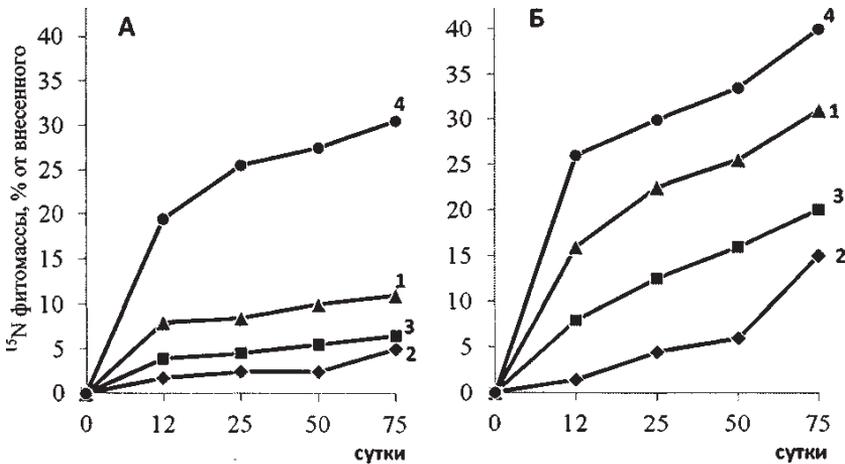


Рисунок 3.2.12.2. Газообразные потери азота фитомассы многолетних трав и минерального удобрения в процессе их минерализации внеэродированной (А) и эродированной (Б) дерново-подзолистой почве: 1 – клевер, 2 – тимфеёвка, 3 – клевер + тимфеёвка, 4 – сульфат аммония ( $N_a$ ).

Включение азота фитомассы многолетних трав в микробную биомассу (временная иммобилизация) имеет важное агроэкологическое значение, поскольку снижает размеры его газообразных потерь. При внесении сульфата аммония потери азота из неэродированной почвы достигают 32%, а из эродированной возрастают до 42% от внесенного. Минимальное количество азота в форме газообразных соединений терялось при внесении фитомассы тимфеёвки: 4 и 16% соответственно. При внесении фитомассы многолетних трав из неэродированной почвы теряется азота в 4,6 раза, а из эродированной почвы в 1,7 раза меньше по сравнению с его потерями при внесении сульфата аммония. По количеству газообразных потерь азота фитомассы многолетние травы образуют следующий ряд: клевер > клевер + тимфеёвка > тимфеёвка.

Многолетние травы оказывают существенное влияние на плодородие почвы, поскольку с пожнивными остатками в нее поступает до 100 кг/га азота. Роль многолетних трав возрастает при их выращивании на эродированных почвах, поскольку, кроме повышения их плодородия, практически предотвращает поверхностный и внутренний сток азота (Каштанов, Явтушенко, 1997). В тоже время в эродированных почвах складываются специфические условия трансформации азота. Так, в процессе эрозии чернозема типичного (Курская обл.) накапливается большее количество азота удобрений в фульвокислотах с параллельным снижением его в гуминовых кислотах, что связано с относительно большей подвижностью иммобилизованного азота удобрений в составе гумуса. Что касается эродированных дерново-подзолистых почв, то вопросы формирования комплекса органического вещества при участии азота удобрений и азота многолетних трав остаются неизученными.

Применение в исследованиях тяжелого стабильного изотопа азота  $^{15}N$  в качестве «метки» азотных удобрений обеспечило более глубокое пони-

мание особенностей трансформации азота удобрений в почве. Известно, что 20–40% азота от применяемой дозы азотных удобрений закрепляется в почвенном органическом веществе и практически не используется растениями в год его внесения. При внесении в дерново-подзолистую почву бесподстилочного навоза и надземной массы (НМ) клевера (меченного  $^{15}\text{N}$ ) закрепляется большее количество внесенного азота по сравнению с азотом минеральных удобрений (Серегин, 2000). Однако механизм этого явления остался неисследованным.

Достаточно надежное объяснение механизма иммобилизации азота дает определение размеров включения азота удобрений во фракции органического вещества почвы. Характер закрепления меченого  $^{15}\text{N}$  удобрений соответствует характеру распределения природного органического азота почвы. Для почв дерново-подзолистого типа характерно большее накопление вновь иммобилизованного азота удобрений в легкогидролизуемых фракциях гуминовых и фульвокислот.

При внесении в дерново-подзолистую почву (модельный опыт) сульфат аммония и НМ многолетних трав (меченных  $^{15}\text{N}$ ) изменяется структура баланса азота в зависимости от его источника (табл. 3.2.12.12). Наибольшее количество азота закрепляется в почве при внесении НМ тимофеевки; наименьшее – сульфата аммония. При этом на среднесмытой почве закрепляется меньшее количество азота по сравнению со слабосмытой почвой независимо от его источника.

Таблица 3.2.12.12 – Баланс азота удобрений и азота многолетних трав в дерново-подзолистой почве при компостировании в течение 75 сут\*

Вариант опыта	Осталось в почве				Потери			
	Слабосмытая почва		Среднесмытая почва		Слабосмытая почва		Среднесмытая почва	
	мг/100г	% от внесенного	мг/100г	% от внесенного	мг/100г	% от внесенного	мг/100г	% от внесенного
Сульфат аммония	13,7	68	11,6	58	6,3	32	8,4	42
Клевер	17,8	89	13,7	68	2,2	11	6,3	32
Тимофеевка	19,1	96	16,7	84	0,9	4	3,3	16
Клевер (70%) + тимофеевка (30%)	18,7	94	14,4	72	1,3	6	5,6	28

\* Доза азота удобрений и доза азота многолетних трав – 20 мг/100 г почвы

Наименьшее количество азота терялось при внесении в почву НМ тимофеевки, а наибольшее – при внесении сульфата аммония. При этом на среднесмытой почве потери азота больше, чем на слабосмытой, независимо от его источника (Шмырева и др., 2012).

Таким образом, в дерново-подзолистой почве (средне- и слабосмытой) закрепляется больше азота многолетних трав (клевер, тимофеевка и клевер + тимофеевка), чем азота минеральных азотных удобрений. Исследование включения меченого азота  $^{15}\text{N}$  во фракции органического вещества почвы позволило выявить причины этого явления (табл. 3.2.12.13).

Таблица 3.2.12.13 – Включение азота фитомассы многолетних трав и азот удобрений во фракции органического вещества среднесмыглой дерново-подзолистой почвы

Вариант опыта	Содержание иммобилизованного азота	Гуминовые кислоты						Фульвокислоты			Негидролизуемый остаток
		фракции			сумма	фракции			сумма		
		I	II	III		I	II	III			
<i>Слабосмыглая почва (плакор)</i>											
Сульфат аммония	13,7 100	2,0 15	нет	0,4 2	2,4 17	1,9 9	3,9 28	1,7 12	0,6 6	7,5 55	3,8 28
Клевер	17,8 100	2,7 15	нет	0,9 5	3,6 20	1,7 10	5,3 30	2,4 13	0,9 5	10,3 58	3,9 22
Тимофеевка	19,1 100	2,3 12	нет	0,6 3	2,9 15	2,2 12	6,2 32	2,8 15	1,4 4	12,0 63	4,2 22
Клевер (70%) + тимофеевка (30%)	18,7 100	2,5 13	нет	0,7 4	3,2 17	1,9 10	5,7 30	2,7 14	1,1 7	11,4 61	4,0 22
<i>Среднесмыглая почва</i>											
Сульфат аммония	11,6 100	1,0 9	нет	0,3 2	1,3 11	1,4 12	3,1 27	1,6 14	0,8 6	6,9 59	3,4 30
Клевер	13,7 100	1,7 14	нет	0,7 5	2,4 19	1,9 14	2,2 16	2,4 18	1,2 7	7,7 55	3,6 26
Тимофеевка	16,7 100	2,2 13	нет	0,5 3	2,7 16	2,4 14	1,2 7	2,8 17	1,8 12	8,0 50	6,0 36
Клевер (70%) + тимофеевка (30%)	14,4 100	1,8 13	нет	0,6 4	2,4 17	2,0 14	1,9 13	2,7 19	1,4 9	8,0 55	4,0 28

Примечание: в числителе – азот удобрений и многолетних трав, мг/100 г; в знаменателе – то же, % от закрепленного N в почве.

В дерново-подзолистой почве большее количество азота удобрений включается во фракцию фульвокислот (50–63% от иммобилизованного азота) независимо от степени эрозии от источника азота. При внесении в дерново-подзолистую почву НМ многолетних трав их азот наиболее активно включается в синтез фракции гуминовых кислот, фульвокислот и негидролизуемого остатка по сравнению с сульфатом аммония.

При внесении в почву НМ клевера наибольшее количество азота включается в легкоподвижную фракцию I гуминовых кислот, тогда как при внесении НМ тимофеевки – во фракцию I фульвокислот. Наибольшее абсолютное количество азота тимофеевки закрепляется в негидролизуемом остатке (по сравнению с остальными вариантами).

На среднесмытой дерново-подзолистой почве наибольшее количество азота тимофеевки включается во фракцию I гуминовых кислот и во фракцию Ia фульвокислот, а также в негидролизуемый остаток. В целом же на среднесмытой почве снижается включение  $^{15}\text{N}$  многолетних трав в фульвокислоты за счет снижения его уровня во фракции I, поскольку количество  $^{15}\text{N}$  во фракциях Ia и III возрастает, а во фракции II – не меняется по сравнению с почвой верхней части склона.

При внесении сульфата аммония и НМ многолетних трав на среднесмытой почве установлена большая относительная степень обогащения азотом негидролизуемого остатка (26–36%) по сравнению с почвой плакора (22–28%). При этом относительно большую долю занимает азот тимофеевки, меньшую – азот клевера. Динамика трансформации иммобилизованного азота в почвах дерново-подзолистого типа характеризуется первоначальным накоплением  $^{15}\text{N}$  в легкогидролизуемой фракции фульвокислот и его дальнейшей реминерализацией, а также участием этого азота в синтезе легкогидролизуемой фракции гуминовых кислот.

Меченый азот клевера и тимофеевки сразу же вовлекается во внутрипочвенный минерализационно-иммобилизованный цикл азота, ускоряя его оборачиваемость. На ход этих процессов существенное влияние оказывает соотношение C:N в надземной массе клевера и тимофеевки. Большая иммобилизация азота НМ тимофеевки связана с более широким соотношением C:N по сравнению с клевером. Активная иммобилизация азота тимофеевки обусловлена большим включением меченого азота в менее подвижные фракции органического вещества почвы.

Таким образом, впервые с применением стабильного тяжелого изотопа  $^{15}\text{N}$  определены размеры включения азота фитомассы многолетних трав во фракции органического вещества дерново-подзолистой почвы, подверженной водной эрозии. В процессе эрозии почвы снижается включение азота многолетних трав в легкоподвижные фракции гуминовых кислот и фульвокислот. Азот многолетних трав больше закрепляется в почве и меньше теряется по сравнению с азотом минеральных удобрений.

Потери азота существенно меньше (в 2,9–8 раз в приводораздельной части склона и в 1,3–2,6 раза в нижней части склона) при внесении в почву фитомассы многолетних трав по сравнению с потерями азота при внесении азотных минеральных удобрений.

Иммобилизация азота существенно возростала (в 1,3–1,4 раза в приводо-раздельной части склона и в 1,2–1,4 раза в нижней части склона) при внесении в почву фитомассы многолетних трав по сравнению с иммобилизацией азота при внесении азотных минеральных удобрений.

Водная эрозия не только вызывает снижение общего количества органического вещества в почве, но и затрагивает глубинные процессы его трансформации. В дерново-подзолистой почве большее количество вновь внесенного азота включается во фракцию фульвокислот независимо от степени эрозии и источника азота. Азот многолетних трав более активно включается в синтез гуминовых кислот, фульвокислот и негидролизуемого остатка по сравнению с азотом сульфата аммония. При внесении НМ клевера максимальное количество азота включается в легкоподвижные фракции гуминовых кислот, при внесении НМ тимopheевки – в легкоподвижные фракции фульвокислот и в негидролизуемый остаток. В почве, подверженной эрозии, снижается включение  $^{15}\text{N}$  многолетних трав в легкоподвижные фракции фульвокислот, при этом возрастает доля азота негидролизуемого остатка.

Высока роль многолетних бобовых трав (и их смесей) в защите почвы от эрозии и охране окружающей среды от загрязнения продуктами эрозии почв. На склоновых землях многолетние травы являются основой агромерилоративного почвозащищенного комплекса, специализированных почвозащищенных севооборотов. Мощная корневая система многолетних трав скрепляет верхний слой почвы и защищает его от разрушительного действия водной эрозии склоновых почв.

Не только эрозия почвы воздействует на бобовые растения, но они сами оказывают влияние на состояние окружающей среды в процессе эрозии (табл. 3.2.12.13). В Центрально-Черноземном регионе за весенний период ежегодно стекает с пашни 294, озимых культур – 529 и трав – 674 м<sup>3</sup>/га воды и смывается 4,8; 2,2; 0,2 т/га мелкозема соответственно (Каштанов, Явтушенко, 1997).

Таблица 3.2.12.14 – Потери гумуса и элементов питания от эрозии почв в ЦЧР (Каштанов, Явтушенко, 1997)

Агрофон	Потери, кг/га·год		
	с водой	с почвой	общее
<i>Гумус</i>			
Зябь	-	369	369
Озимые	-	155	155
Клевер+тимopheевка	-	15	15
<i>Азот</i>			
Зябь	1,1	18	19,1
Озимые	1,4	8	9,4
Клевер+тимopheевка	1,9	0,8	2,3
<i>Фосфор</i>			
Зябь	0,1	12	12,1
Озимые	0,2	5	5,2
Клевер+тимopheевка	0,4	0,5	0,9

Агрофон	Потери, кг/га·год		
	с водой	с почвой	общее
<i>Калий</i>			
Зябь	0,9	101	101,9
Озимые	2,6	43	45,6
Клевер+тимофеевка	3,6	4	7,6
<i>Кальций</i>			
Зябь	16,6	105	121,6
Озимые	32,6	44	76,6
Клевер+тимофеевка	50,0	4	54,0
<i>Магний</i>			
Зябь	4,1	63	67,1
Озимые	7,5	27	34,5
Клевер+тимофеевка	10,7	3	13,7

При выращивании с водой теряется азота, калия и магния – в 1,4 раза, кальция – в 1,5; фосфора – в 2 раза больше, чем под озимыми культурами. Основное количество гумуса и элементов питания уходит с твердым стоком (мелкоземом). При выращивании трав потери гумуса и элементов питания с твердым стоком ниже примерно в 10 раз по сравнению с озимыми культурами. Наибольшее количество гумуса и элементов теряется по зяби: в 2–20 раз выше, чем под растениями.

### 3.2.13 Устойчивость бобовых растений к биотическим факторам

Устойчивость бобовых растений к действию биотических факторов тесно связана с особенностями их роста и развития, местом, занимаемым в севообороте, требованиями к почвенным и погодным условиям, а также зависит от взаимоотношений с микроорганизмами и сорняками. Устойчивость бобовых к сорнякам в большей степени обуславливается темпами их роста и формирования биомассы. В то же время взаимоотношения между бобовыми и сорными растениями определяются видовым составом сообщества сорняков. Так, однолетний люпин обладает низкой устойчивостью к сорнякам в начальный период роста: он развивается медленно, тогда как сорняки активно растут и затеняют его (Лошаков, 2015). Поэтому на первое место выходит борьба с сорняками на стадии предшественника.

Горох в качестве предшественника подавляет большее количество сорняков (их доля в посевах озимой пшеницы составляла 18–21%), тогда как после подсолнечника доля сорняков увеличивалась до 18–30% (Куликова и др., 2008). Потери урожая бобовых растений зависят от степени засоренности их посевов, %: у гороха – 22, у сои – 70, у вики – 31, у бобов – 34 (Зуза, 1994; Ладонин, 2000).

В условиях севооборота регулируемыми факторами устойчивости растений к сорнякам являются обработка почвы и состав агрофитоценоза. Фи-

тосанитарное состояние посевов также способны регулировать сидераты. Наиболее эффективно сорную растительность подавляют смешанные посевы сидератов (вико-овес, соя – подсолнечник) (Гребенников, 2008, 2011).

В двух полях севооборота на черноземе обыкновенном наименьшее количество сорняков произрастало при отвальной системе обработки почвы (табл. 3.2.13.1). При безотвальной системе обработки численность сорняков возрастала в 1,8–2 раза по сравнению с отвальной обработкой почвы. В чистых посевах клевера численность сорняков снижалась в 2 раза, а их биомасса – в 1,1–1,3 раза по сравнению со смешанным посевом клевера с овсом (Борин и др., 2013). Способность бобовых растений противостоять сорнякам зависит от ряда экологических факторов: длины периода вегетации; реакции культурных и сорных растений на погодные условия роста; фитосанитарного состояния поля; агротехнической технологии выращивания (Зуза, 1994).

Таблица 3.2.13.1 – Засоренность посевов культур севооборота при разных системах обработки почвы (Борин и др., 2013)

Обработка почвы	Поля севооборота	
	Овес – клевер	Клевер
Отвальная	$\frac{34}{745}$	$\frac{19}{710}$
Безотвальная	$\frac{67}{1050}$	$\frac{34}{795}$
Комбинированная	$\frac{52}{811}$	$\frac{29}{665}$

Примечание: в числителе – количество сорняков, шт./м<sup>2</sup>; в знаменателе – масса сорняков, г/м<sup>2</sup>.

Подавление биомассы сорняков в посевах гороха вызвано его высокой конкурентной способностью. В то же время растения сои растут медленно, засоренность посевов возрастает, в результате потери урожая достигают 70% (табл. 3.2.13.2).

Таблица 3.2.13.2 – Засоренность посевов и потери урожая бобовых растений (Зуза, 1994)

Растения	Засоренность посевов		Урожай культур на засоренном фоне, ц/га	Потери урожая, %
	кол-во сорняков, шт./м <sup>2</sup>	сухая масса сорняков, г/м <sup>2</sup>		
Горох	462	282	18,8	22
Соя	105	473	7,2	70

Ряд представителей семейства бобовых выступают в качестве сорняков в посевах культурных растений, то есть играют роль биотического фактора. В связи с этим важно знать, какое количество молекулярного азота фиксируют бобовые сорняки. Однако до настоящего момента вопрос остается открытым. В то же время сорняки семейства бобовые оказывают влияние на другие растения.

*Горошек посевной* засоряет зерновые культуры, его семена похожи на семена чечевицы. *Горошек узколистный*, вьющееся травянистое растение, сильно засоряет зерновые культуры. *Горошек мышиный* – многолетнее тра-

вянистое растение, засоряет посевы многих культур. Плоды и органы *донника* содержат кумарин, запах которого передается зерну. *Термонсис* – сорняк посевов пшеницы, содержит несколько видов алкалоидов, очень ядовит. *Софора лисохвостная (брунец)* – многолетнее травянистое растение, карантинный сорняк, из-за наличия алкалоидов семена ядовиты, придают горький вкус муке, которая становится несъедобной. *Вязель (заячий клевер)* относится к вредной примеси во ржи, семена придают горький вкус муке. Ядовитое вещество *вyezля* вызывает тошноту, воспаление слизистых оболочек органов пищеварительной системы.

Кроме того, высокую устойчивость к вредителям и болезням бобовым растениям обеспечивает наличие в тканях следующих специфических соединений: фитогемагглютинин, соетин в сое; ингибитор протеазы личинок мучнистого хрущака в сое и нуте; сложный полисахарид, обеспечивающий устойчивость фасоли к личинкам зерновки; сапонины в люцерне и алкалоиды в люпине.

Зеленая масса бобовых сидератов является эффективным средством подавления возбудителей корневых инфекций. Воздействуя на патогены, сидераты снижают поражение злаковых культур опасными корневыми гнилями, а ячменя – злаковыми блошками и шведской мухой (Такунов и др., 2000; Schulzetal., 2000). Запаханная биомасса люпина снижала заболеваемость клубней картофеля паршой и ризоктонией, поражение нематодой (Новиков, 2002).

Бактерии *Klebsiella pl.* относятся к эндогенным организмам, поскольку они проникают внутрь тканей растений и мигрируют в двух направлениях: от корней к листьям и от листьев к корням. *Klebsiella pl.* повышают накопление ассимилированного углерода в листьях и корнях в два раза, усиливают активность нитрогеназы в 4–7,5 раз. Инокуляция растений ризобактериями *Klebsiella pl.* снижает поражение ячменя корневыми гнилями и темно-бурой пятнистостью листьев. Небольшие дозы азотных удобрений (30 кг N/га) стимулируют антагонистические свойства ризобактерий.

Азотфиксирующие микроорганизмы разных видов (*Klebsiella planticola*, *Agrobacterium radiobacter*, *Arthrobacter mysorens*) синтезируют ростовые вещества, повышают иммунитет растений, обеспечивают их устойчивость к низким положительным температурам, дефициту почвенной влаги (Селицкая и др., 2009). В основе механизмов устойчивости – снижение интенсивности транспирации, повышение концентрации хлорофилла и продуктивности фотосинтеза, усиление роста корней и листового аппарата.

Устойчивость бобовых растений к биотическим факторам развивается на уровне ризосферных микроорганизмов. Только 1–4% ризосферных бактерий обладают протекторными свойствами и механизмами защиты от фитопатогенной микрофлоры. Наиболее сильно подавляющее действие на развитие микромицетов *Fusarium*, *Alternaria*, *Aspergillus* оказывали штаммы азотобактера и азоспирилл, однако диазотрофы не влияли на развитие грибов рода *Trichoderma*. Диазотрофы *Azospirillum brasilense* на 20–23% подавляли распространение корневой гнили у озимой пшеницы. Диазотрофные бактерии снижали в 2–3 раза заболеваемость злаков мучнистой росой и в 1,5–2 раза поражаемость сахарной свеклы церкоспорозом. Обработка

семян диазотрофами вызывает у амаранта устойчивость к болезням, вызываемым почвенными и эпифитными грибами, благодаря их фунгистатическим свойствам и повышению в 1,1–22,2 раза энергии прорастания семян (Дегтярева и др., 2006).

Иногда от применения нитрагина не наблюдалось эффекта потому, что на корнях бобовых растений клубеньки образованы спонтанными клубеньковыми бактериями (белого цвета, мелкими и неактивными) (Доросинский, 1989). Это объясняется высокой конкурентной способностью спонтанных клубеньковых бактерий, определяющих характер взаимоотношений с растением-хозяином в азотфиксирующей симбиотической системе.

Высокая конкурентная способность штамма проявляется прежде всего в его способности проникать в корневые волоски бобового растения. Кроме того, для таких штаммов характерна генетическая близость к растению-хозяину: высокая конкурентная способность штамма на одном сорте существенно снижается на другом сорте одного вида бобовой культуры. Нитрагин может не дать ожидаемого эффекта в том случае, если в ризосфере инокулированного бобового растения количество спонтанных микроорганизмов, хотя и слабоконкурентного нитрагинного штамма, существенно превосходит количество высококонкурентного нитрагинного штамма.

Смешанные с другими культурами посевы бобовых растений (вико-овес, бобово-злаковые травы) широко распространены в земледелии. При этом сложные физиолого-биохимические донорно-акцепторные взаимоотношения строятся на корневых выделениях растений и микроорганизмах в почве. Растения-доноры, выделяя через корни продукты метаболизма, создают специфическую среду (называемую «внешний гомеостаз»), обеспечивают условия роста и развития других организмов-акцепторов.

Через корневую систему растения транспортируют в почву органические и неорганические соединения, участвующие во внутриклеточном обмене: гемицеллюлозы, аминокислоты, органические кислоты, сахара, витамины, нуклеиновые кислоты, ферменты, флавоны, алкалоиды, азот, фосфор, калий, натрий, кальций (Иванов, 1973).

В состав азотсодержащих корневых выделений входят: аминокислоты (глутаминовая, аспарагиновая, серин, аланин, валин, лейцин, фенилаланин, лизин, треонин, тирозин, гликокол, триптофан, пролин). Корни растений выделяют также амиды, аминный, аммонийный и нитратный азот. Преобладающими аминокислотами в корневых выделениях являются аспарагиновая и глутаминовая кислоты.

Проростки гороха в условиях подкисления усиливали отток аммонийного азота в питательный раствор до 17 мг/сут, что в два раза больше по сравнению с поглощением (Прянишников, 1945). При подкислении питательного раствора усиливается выделение аминокислот. Выделение  $^{15}\text{NO}_3^-$  находится в прямой зависимости от его концентрации в клетках корня. Выделение нитрата корнями является активным процессом и осуществляется системой переносчиков (Ивашикина, Соколов, 2001).

В процессе вегетации растительные организмы разных видов при совместном произрастании способны многократно выделять и поглощать

питательные вещества. Корневые азотсодержащие выделения участвуют в круговороте веществ агрофитоценоза (Соколов, Семенов, 1983). Часть азота, выделенного донором, потребляют растения-акцепторы, часть – поглощается микроорганизмами, остальное используется на формирование органического вещества почвы. За период вегетации меченый азот  $^{15}\text{N}$  донора через корневые системы растений-акцепторов перемещается на расстояние 40–60 см от него. Растения-акцепторы способны использовать 17–39% меченого азота донора. Кормовые бобы могут выделять в почву до 15% азота фиксированного симбиотически (Трепачев, 1999).

Количество фиксированного азота, поступающего в небобовый компонент, зависит от видового состава ценоза и почвенных условий. Так, райграс способен накапливать до 79% азота, фиксированного клевером, а растения кукурузы – 52% азота вигны (Кореньков, 1999). Поступление фиксированного азота в небобовый компонент усиливается при низком уровне минерального азота в почве. Если рассматривать передачу только фиксированного азота, то она не в полной мере отражает транспортные процессы этого элемента в сложном биоценозе. На самом деле азот небобового компонента поступает и в бобовые растения. При этом обмен идет не только фиксированным азотом, но и азотом почвы и азотом удобрения (Соколов, Семенов, 1983).

В смешанных посевах злаковые культуры играют роль защитного компонента (барьерный эффект) при вторичном заражении и распространении инфекции (Новиков и др., 2002). Смешанные посевы люпина со злаковыми снижают его поражение рядом болезней (серая гниль, вирусная узколистность, антракноз).

Устойчивость к фитопатогенам поддерживает система севооборотов. Так, не допускается повторный посев люпина после зернобобовых из-за поражения его фузариозом (Лошаков, 2015). Поэтому люпин можно выращивать на одном и том же поле не раньше чем через 4–5 лет.

Содержание азота в овсе смешанных посевов с викой повышалось на 0,2–0,8% (Ягодина, Трепачев, 1989). Это происходило за счет вики, которая продуцирует в почву значительное количество азота и углерода. Фиксация азота викой возрастала как в чистых, так и в смешанных посевах при повышении уровня подвижного фосфора в почве (табл. 3.2.13.3). Азотные удобрения снижали размеры азотфиксации викой. При этом снижение азотфиксации в смешанном посеве оказалось меньше, чем в чистом посеве вики. В смешанных посевах на 8–25% повышался коэффициент азотфиксации. При высокой влажности почвы азотфиксация викой в чистом посеве снижалась, тогда как в смешанном посеве она повышалась.

В пересчете на одно растение вика в смешанном посеве фиксировала азота атмосферы больше, чем в одновидовом. С увеличением доли овса в посеве (с 2:1 на 1:2) росло количество азота, фиксируемое викой, – с 1,58 до 3,34 мг N/р/сут. В то же время в пересчете на единицу площади вика в смешанном посеве фиксировала азота меньше, чем в чистом (с 35,7 мг N/м<sup>2</sup> до 26,5 мг N/м<sup>2</sup>).

Таблица 3.2.13.3 – Потребление общего и симбиотического азота викой и овсом в чистом и смешанном посевах (Ягодина, Трепачев, 1989)

Вариант	Раздельный посев				Смешанный посев								С учетом $N_{\text{симб}}$ в овесе, %
	$N_{\text{общ}}^{\text{г}}$ , г/м <sup>2</sup>	вика			$N_{\text{общ}}^{\text{г}}$ , г/м <sup>2</sup>			$N_{\text{симб}}^{\text{г}}$ , г/м <sup>2</sup>			$N_{\text{симб}}^{\text{г}}$ % от $N_{\text{общ}}^{\text{г}}$		
		$N_{\text{общ}}^{\text{г}}$ , г/м <sup>2</sup>	$N_{\text{симб}}^{\text{г}}$ , г/м <sup>2</sup>	КФ, %	смесь	вика	овес	смесь	вика	овес	вики	овса	
Фон 1	<u>7,9</u> 11,9	<u>17,4</u> 20,8	<u>9,5</u> 8,9	<u>54,6</u> 42,8	<u>17,0</u> 16,1	<u>14,3</u> 7,1	<u>2,7</u> 9,0	<u>9,1</u> 4,2	<u>8,3</u> 3,1	<u>0,8</u> 1,1	<u>58,0</u> 43,7	<u>29,6</u> 12,2	<u>63,6</u> 59,2
Фон1 + P <sub>60</sub>	<u>8,3</u> 11,9	<u>17,5</u> 24,4	<u>9,2</u> 12,5	<u>52,6</u> 51,2	<u>18,5</u> 18,6	<u>15,7</u> 8,6	<u>2,8</u> 10,0	<u>10,2</u> 6,7	<u>9,4</u> 5,3	<u>0,8</u> 1,4	<u>59,9</u> 61,6	<u>28,6</u> 14,0	<u>54,9</u> 77,9
Фон1 + N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	<u>12,3</u> 14,5	<u>22,4</u> 24,2	<u>10,1</u> 9,7	<u>45,1</u> 10,1	<u>22,2</u> 20,5	<u>18,6</u> 10,0	<u>3,6</u> 10,5	<u>9,9</u> 6,0	<u>9,3</u> 5,3	<u>0,6</u> 0,7	<u>50,0</u> 53,0	<u>16,6</u> 6,6	<u>53,2</u> 60,0
Фон2	<u>8,8</u> 11,7	<u>21,0</u> 25,9	<u>12,2</u> 14,2	<u>85,1</u> 54,8	<u>20,4</u> 19,4	<u>16,3</u> 10,3	<u>4,1</u> 9,1	<u>11,5</u> 7,7	<u>10,3</u> 6,4	<u>1,2</u> 1,3	<u>63,2</u> 62,1	<u>29,3</u> 14,3	<u>70,6</u> 74,8
Фон2 + P <sub>60</sub>	<u>9,0</u> 11,8	<u>22,3</u> 23,5	<u>13,3</u> 11,7	<u>59,6</u> 49,7	<u>21,2</u> 19,7	<u>17,1</u> 10,1	<u>4,1</u> 9,6	<u>12,2</u> 7,9	<u>10,9</u> 6,5	<u>1,3</u> 1,4	<u>63,7</u> 65,3	<u>21,7</u> 14,4	<u>71,3</u> 78,2
Фон2 + N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	<u>11,5</u> 14,1	<u>23,8</u> 24,1	<u>12,3</u> 10,0	<u>51,7</u> 41,5	<u>23,2</u> 21,0	<u>19,1</u> 11,1	<u>4,1</u> 9,9	<u>11,7</u> 6,9	<u>11,0</u> 6,0	<u>0,7</u> 0,9	<u>57,6</u> 54,1	<u>17,1</u> 9,1	<u>61,3</u> 62,2

Примечание:  $N_{\text{общ}}$  приведен за вычетом азота семян; в числителе – 1983год ( вико-овсяная смесь в соотношении 2:1); в знаменателе – 1984 год ( вико-овсяная смесь в соотношении 1:2).

Таблица 3.2.13.4 – Использование азота из разных источников викой и овсом в чистом посеve и в смеси (Ягодина, Трепачев, 1989)

Вариант	Использовано $N_{\text{общ}}^{\text{г}}$ , г/м <sup>2</sup>	Избыток $^{15}N$ , ат %	Использовано $^{15}N$ удобрений, % от внесенной дозы	Использовано азота растениями из					
				удобрения		почвы		воздуха	
				г/м <sup>2</sup>	N, % от общего	г/м <sup>2</sup>	N, % от общего	г/м <sup>2</sup>	N, % от общего (КФ)
<i>Овес (чистый посев)</i>									
Фон1 + N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	<u>12,3</u> 14,5	<u>4,31</u> 4,02	<u>36,0</u> 39,0	<u>2,15</u> 2,33	<u>17,5</u> 16,1	<u>10,15</u> 12,17	<u>82,6</u> 83,9	-	-
Фон2 + N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	<u>11,5</u> 14,1	<u>4,47</u> 4,04	<u>34,8</u> 38,0	<u>2,08</u> 2,27	<u>18,1</u> 16,1	<u>9,42</u> 11,83	<u>81,9</u> 83,9	-	-
<i>Вика (чистый посев)</i>									
Фон1 + N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	<u>22,4</u> 24,2	<u>2,52</u> 2,32	<u>38,5</u> 37,5	<u>2,30</u> 2,24	<u>10,3</u> 9,3	<u>10,69</u> 11,55	<u>47,7</u> 47,7	<u>9,41</u> 10,41	<u>42,0</u> 43,0
Фон2 + N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	<u>23,8</u> 24,1	<u>2,49</u> 2,25	<u>40,2</u> 36,2	<u>2,40</u> 2,16	<u>10,1</u> 9,0	<u>10,69</u> 11,10	<u>44,9</u> 46,0	<u>10,71</u> 10,84	<u>45,0</u> 45,0
<i>Вика (из смеси)</i>									
Фон1 + N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	<u>11,6</u> 10,0	<u>1,87</u> 1,15	<u>23,6</u> 7,7	<u>1,41</u> 0,46	<u>7,6</u> 4,6	<u>6,59</u> 2,34	<u>35,4</u> 23,4	<u>10,60</u> 7,20	<u>57,0</u> 72,0
Фон2 + N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	<u>19,1</u> 11,1	<u>1,98</u> 1,10	<u>25,6</u> 8,0	<u>1,53</u> 0,48	<u>8,0</u> 4,3	<u>6,87</u> 2,52	<u>36,0</u> 22,7	<u>10,70</u> 8,10	<u>56,0</u> 73,0
<i>Овес (из смеси)</i>									
Фон1 + N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	<u>3,6</u> 10,5	<u>3,83</u> 4,82	<u>9,2</u> 26,8	<u>0,55</u> 1,60	<u>15,3</u> 15,2	<u>2,55</u> 8,31	<u>76,1</u> 79,2	<u>0,50</u> 0,59	<u>13,9</u> 5,6
Фон2 + N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	<u>4,1</u> 9,9	<u>3,81</u> 3,79	<u>10,6</u> 25,1	<u>0,63</u> 1,50	<u>15,4</u> 15,2	<u>2,80</u> 7,68	<u>68,3</u> 77,6	<u>0,67</u> 0,72	<u>16,3</u> 7,2
<i>Вико-овсяная смесь</i>									
Фон1 + N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	<u>22,2</u> 20,5	<u>2,18</u> 2,52	<u>32,8</u> 34,5	<u>1,96</u> 2,06	<u>8,8</u> 10,0	<u>9,14</u> 10,65	<u>41,2</u> 52,0	<u>11,10</u> 7,79	<u>50,0</u> 38,0
Фон2 + N <sub>60</sub> P <sub>60</sub>	<u>23,2</u> 21,0	<u>2,29</u> 2,38	<u>36,0</u> 33,3	<u>2,15</u> 1,99	<u>9,3</u> 9,5	<u>9,68</u> 10,9	<u>41,7</u> 48,5	<u>11,37</u> 8,82	<u>49,0</u> 42,0

Примечание: в числителе – 1983 год; в знаменателе – 1984 год.

Вика в одновидовом посеве потребляла азота удобрения и азота почвы больше по сравнению с овсом в чистом посеве (табл. 3.2.13.4). Потребление азота удобрения растениями зависело от соотношения вики и овса в смешанном посеве: при соотношении 2:1 вика потребляла 24–26% азота, овес – 9–11% от применяемой дозы, тогда как при соотношении 1:2 вика использовала 7–8%, овес – 25–27% (Ягодина, Трепачев, 1989). Та же закономерность сохраняется при потреблении азота почвы: при соотношении 2:1 вика потребляла 6,59 г/м<sup>2</sup>, овес – 2,74 г/м<sup>2</sup>; при соотношении 1:2 вика усваивала 2,34 г/м<sup>2</sup>, овес – 8,31 г/м<sup>2</sup>. Доля симбиотического азота у вики в смешанном посеве с соотношением 1:2 составила 73%, в чистом – 45%. При соотношении 2:1 доля симбиотического азота в овсе – 14–16%, тогда как при соотношении 1:2 – 6–7%.

На количество фиксированного азота влияет состав агрофитоценоза. Клевер белый в смеси с райграсом фиксировал 99–213 кг N/га, тогда как в монокультуре белый клевер накапливал 30–46 кг N/га, а клевер красный 24–36 кг N/га (Vinter, Jensen, 2000). Тимофеевка в смеси с клевером использовала 25 кг N/га биологически фиксированного азота (Посыпанов и др., 1991). Злаки накапливают 63% своего азота за счет люцерны и 79% за счет лядвенца, в котором 13% фиксировано люцерной и 17% азота, фиксированного лядвенцем (Трепачев, 1999). В смешанных посевах наибольшее количество азота (<sup>15</sup>N) от бобового компонента (люцерна, клевера, сераделла) в злаки поступало на второй год посева и составляло 36% от общего азота (Heichel, Nenuum, 1991). Поэтому небобовые компоненты обеспечивали свою потребность в азоте за счет фиксированного молекулярного азота.

При выращивании бобовых в смеси с культурами семейства мятликовых в зеленой массе последних увеличивается количество белка, повышаются его усвояемость и переваримость (Посыпанов и др., 2007). Так, в зеленой массе овса содержится 11% сырого белка, а в смеси с викой – в 1,5 раза больше. Если в вико-овсяной смеси доля вики составляет 55–60%, содержание сырого белка в массе овса достигает 14%; при снижении доли вики в смеси в два раза (20–30%) содержание сырого белка не превышало 9%.

Использование нормы высева смеси вики с овсом 1,5 млн: 2 млн (вместо 1,3 млн: 3 млн) увеличивает семенную продуктивность бобового компонента в два раза, не вызывая полегания посевов; в более загущенном посеве овса вика меньше ветвится (Дебелый и др., 2016). Устойчивыми к овсу и пригодными для выращивания в смешанных посевах оказались сорта вики Непоседа, Спутница и Уголек. Сорт сои Немчиновская юбилейная, несмотря на высокую продуктивность в чистом (одновидовом) посеве, в смешанных посевах с овсом снижает урожай.

Изменение видового состава агрофитоценоза лежит в основе разработки и управления экологически безопасным круговоротом азота в системе почва – растение. Снижение нагрузки минерального азота на систему становится приоритетом в повышении плодородия почв, продуктивности растений, улучшении качества урожая возделываемых культур. Это связано с тем, что весной многолетние бобовые травы испытывают недостаток азота, а проведение подкормок в дозах 30–45 кг N/га не всегда эффективно (Бариннов, Новиков, 2015).

Покровные культуры на дерново-подзолистой почве увеличивали биомассу пожнивно-корневых остатков: бобовые культуры и их смеси со злаковыми растениями повышали накопление элементов питания в ПКО: азота – на 15–27 кг/га, фосфора – на 6–13 кг/га, калия – на 13–19 кг/га. Бобовые ПКО способствовали повышению содержания аммония и  $\text{NO}_3^-$  в почве. Бобовые культуры как в чистом посеве, так и в смешанном со злаковыми улучшали азотное питание клевера и тимофеевки и повышали продуктивность многолетних трав в течение трех лет пользования (табл. 3.2.13.5).

Таблица 3.2.13.5 – Влияние покровных культур на урожай многолетних трав (Баринов, Новиков, 2015)

Покровные культуры	Годы пользования многолетними травами						Сумма за три года
	1-й год (три укоса)		2-й год (два укоса)		3-й год (два укоса)		
	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	
Без покрова	301	100	254	100	137	100	692
Тритикале	318	106	272	107	170	124	760
Люпин узколистный	366	122	321	126	200	146	887
Бобы кормовые	338	112	280	110	213	155	831
Вика + овес	332	110	282	111	179	131	824
Люпин + тритикале	342	114	313	123	187	136	842
Бобы + тритикале	327	109	283	111	205	150	815
$\text{НСР}_{0,5}$ , ц/га	29		27		21		77

Наибольший урожай сена формировали многолетние травы, когда в качестве покровной культуры использовали люпин однолетний: прибавка составила 28%. Несколько меньшую прибавку (22%) обеспечивало сочетание бобов и тритикале. Хотя в чистом посеве тритикале не обогащало почву азотом, тем не менее урожай трав повысился на 10%.

### 3.2.14 Участие бобовых растений в фитомелиорации почв

Бобовые растения в значительной степени различаются по способности накапливать загрязняющие вещества, извлекая их из почвы. Устойчивость бобовых культур к одному загрязняющему веществу не распространяется на другой. Избирательность накопления загрязняющих веществ в фитомассе бобовых растений лежит в основе их использования для фитомелиорации загрязненных почв. Поэтому важна разработка экологически безопасных агроэкологических приемов по оптимизации режимов мелиорируемых земель, обеспечивающих повышение продуктивности возделываемых культур и получения экологически безопасной продукции (Черников, Соколов, 2009; Гурина и др., 2014).

Главными источниками загрязнения агроландшафтов выступают предприятия энергетики, черной и цветной металлургии, химической и нефтехимической промышленности, транспортный и военно-промышленный комплексы, а также предприятия АПК (Черников, Соколов, 2015). Основными путями воздействия на окружающую среду являются загрязнение

воздушного и водного бассейнов, а также поступление в почву веществ антропогенного происхождения. Негативные экологические последствия в экосистемах – это результат нарушений технологий использования земель, выращивания сельскохозяйственных культур и содержания сельскохозяйственных животных.

В связи с переходом животноводства на промышленную основу сложилась критическая экологическая ситуация, связанная с негативным воздействием отходов (бесподстилочный навоз, навозная жижа, стоки) на объекты окружающей среды. Так, длительное (15 лет) применение бесподстилочного навоза и минеральных удобрений в условиях кормового севооборота (дерново-подзолистая почва, Московская обл.) вызывало повышенное содержание  $\text{NO}_3^-$  в почве и в грунтовых водах (табл. 3.2.14.1). Чем выше положительный баланс в севообороте, тем большее количество  $\text{NO}_3^-$  поступало в грунтовые воды.

**Таблица 3.2.14.1– Влияние длительного применения бесподстилочного навоза на распределение нитратов по профилю почвы и загрязнение грунтовых вод (Захаров, 1993)**

Глубина, см	Накопление $\text{NO}_3^-$ , кг/га		
	без удобрений	бесподстилочный навоз	НПК, эквивалент – бесподстилочный навоз
0–100	12	15	120
100–200	9	22	125
200–300	21	78	111
300–450	64	151	152
0–450	115	266	508
$\text{NO}_3^-$ в грунтовых водах, мг/л	3,6	6,9	9,2

При внесении минеральных удобрений в почве накапливалось в 4 раза больше нитратов, чем при применении эквивалентного количества азота бесподстилочного навоза. Максимальное количество  $\text{NO}_3^-$  удерживалось в нижнем горизонте, лежащем выше уровня загрязнения грунтовых вод (Захаров, 1993).

Экологически неблагоприятная ситуация складывается на полях утилизации бесподстилочного навоза, на которых почва загрязнена нитратами, токсическими веществами, патогенными микроорганизмами, яйцами и личинками гельминтов. Загрязнение почвы этих полей влияет на функционирование почвенной биоты и сопряженные водные экосистемы, а также на качество растениеводческой продукции.

Одним из эффективных приемов реабилитации химически и биологически загрязненных почв является введение в севооборот культур интенсивного типа (люпин, люцерна, клевер, донник, сераделла, эспарцет), в урожае которых накапливается 200–400 кг N/га. Особенность состоит в том, что, потребляя большое количество азота, бобовые растения не накапливают  $\text{NO}_3^-$  в урожае, и, кроме того, микроорганизмы ризосферы корневой системы обладают высокими санирующими свойствами против патогенной микрофлоры (Тарасов, Кумеркина, 1998). Так, при выращивании люпина

узколистного и люпина желтого на почве, сильно загрязненной бесподстилочным навозом крупного рогатого скота, через 100 суток спустя полностью погибли патогенные микроорганизмы. В качестве фитореабилитанта успешно используют и многолетний люпин.

На загрязненных тяжелыми металлами полях нельзя выращивать кормовые культуры, поэтому на них в течение 2–3 лет выращивают фитопротекторы (в зависимости от уровня загрязнения почвы). В этом качестве возможно применение бобовых растений: гороха, вики, люцерны. Фитопротекторы возделывают вблизи источников загрязнения почвы тяжелыми металлами: рудников, шахт, предприятий цветной и черной металлургии, химии и нефтехимии, отвалов и свалок. Скошенную биомассу фитопротекторов убирают с загрязненного поля и сжигают в специально отведенных местах. Накопление тяжелых металлов в биомассе растений способствует выведению их из круговорота в агроландшафте и снижению отрицательных последствий техногенеза. Повышенное накопление тяжелых металлов в растениях опасно с точки зрения поступления их в пищевые цепи, но они могут быть успешно использованы в фитомелиорации.

Усиление антропогенной нагрузки на экосистемы сопровождается не только нарушением экологического равновесия агрофитоценозов, но и накоплением тяжелых металлов в почве и растениях. Среди тяжелых металлов медь, цинк, никель занимают особое место, поскольку их избыточное количество в почве является результатом не только хозяйственной деятельности человека, но и естественных почвообразовательных процессов. Эти элементы содержатся в повышенном количестве в составе некоторых почвообразующих пород.

Поступающие тяжелые металлы в растениях вследствие ряда биологических барьеров, накапливаются и распределяются неравномерно (Соколов, Черников, 1999). Неравномерное распределение тяжелых металлов зависит от их вида, вида растений и условий их выращивания (табл. 3.2.14.2).

Таблица 3.2.14.2 – Накопление и распределение тяжелых металлов в бобовых растениях при загрязнении дерново-подзолистой почвы (Гурина и др., 2014)

Части растения	Вариант	Тяжелые металлы, мг/кг			
		Cd	Pb	Zn	Cu
<i>Люпин узколистный</i>					
Зерно	1	0,202	1,39	56,2	4,49
	2	0,284	1,61	68,9	9,87
Створки бобов	1	0,255	1,68	53,3	3,21
	2	0,412	2,98	75,1	10,15
Стебель и листья	1	0,432	2,49	55,1	4,09
	2	0,701	3,01	110,8	9,29
<i>Клевер луговой</i>					
Сено	1	0,40	1,61	45,0	4,9
	2	0,90	7,69	60,0	8,0

Примечание: 1 – исходная почва; 2 – загрязненная почва.

В условиях чистой дерново-подзолистой почвы стебли и листья накапливали Cd и Pb в 1,8–2,1 раза больше, чем зерно, тогда как при загрязнении

почвы – в 1,9–2,5 раза. При загрязнении почвы цинком и медью растения не накапливали эти элементы в стеблях в большем количестве, чем в зерне, и эффективно использовали их для ростовых процессов. При загрязнении почвы содержание кадмия в зерне повышалось в 1,4 раза, в вегетативных органах – в 1,6 раза; Pb – в 1–2 раза и в зерне, и в стеблях; Zn – в 1,2 и 2,0 раза соответственно, Cu – в 2,2 и 2,3 раза соответственно. Створки бобов, защищая зерно, накапливали повышенное количество тяжелых металлов. В сене клевера при загрязнении почвы количество Cd возросло в 2,2 раза, Pb – в 4,8 раза, Zn – в 1,3 раза, Cu – в 1,6 раза. Таким образом, различные органы бобовых растений играют неодинаковую роль в аккумуляции тяжелых металлов, способствуя снижению их количества в почве.

Произрастающие в агрофитоценозе сорняки выполняют функцию фитопротектора из-за способности накапливать значительное количество тяжелых металлов (Можайский, 2003). Так, в условиях загрязненной почвы при наличии сорняков загрязнения гороха кадмием не происходило. Сорняки активно потребляют тяжелые металлы, поэтому агрофитоценоз люпина совместно с сорняками может быть использован на загрязненных почвах для их детоксикации.

При добыче угля открытым способом на поверхность земли выносятся огромная масса глубинных пород, которые загрязняют окружающую среду. Для предотвращения негативного воздействия на нее вскрышных пород их залужают клевером гибридным (Лошаков и др., 2015). На гидроотвалах клевер формирует 1,8–2,4 ц/га воздушно-сухой фитомассы в течение пяти лет, что создает экологически безопасную обстановку в районе отвалов.

Среди полевых культур люпин узколистный способен накапливать в биомассе значительное количество  $^{137}\text{Cs}$  (1,5–3,5 млн Бк  $^{137}\text{Cs}$ /га) (Белоус и др., 1997).

Наибольшее количество  $^{137}\text{Cs}$  люпин потребляет при внесении возрастающих доз фосфорного и калийного удобрений ( $\text{P}_{20-60}\text{K}_{40-120}$ ) (Харкевич и др., 2011). Пестициды, снижая количество сорняков на поле, способствуют большему потреблению  $^{137}\text{Cs}$  и его выносу люпином. Поэтому люпин успешно можно использовать в качестве фитопротектора для реабилитации радиационно загрязненных почв.

Поступление  $^{137}\text{Cs}$  в бобовые зависит от погодных условий. При снижении количества осадков усиливалось накопление радионуклида в растениях (Громова и др., 2006). В условиях серых лесных почв наибольшее количество  $^{137}\text{Cs}$  содержала чечевица (табл. 3.2.14.3).

Таблица 3.2.14.3 – Динамика содержания  $^{137}\text{Cs}$  в органах различных видов растений Бк/кг (Громова и др., 2006)

Растение	Фаза развития	Органы растений		
		корни	листья, стебли	соцветия
Чечевица	цветение	268,6	120,4	80,8
	созревание	326,0	134,2	88,5
Рапс	цветение	370,8	43,0	13,5
	созревание	238,5	33,6	13,4

Максимальное количество радионуклида содержалось в период созревания у чечевицы и в период цветения у рапса. Основное количество  $^{137}\text{Cs}$  накапливалось в корневой системе растений. Индикатором загрязнения почвы являются генеративные органы чечевицы, в которых содержание  $^{137}\text{Cs}$  возросло в 8 раз по сравнению с контрольным участком.

Таблица 3.2.14.4 – Степень очистки почвы от  $^{137}\text{Cs}$  под различными культурами, % от исходного (Громова и др., 2006)

Участок	Год возделывания	Растения	
		чечевица	рапс
Опытный №1	1-й	1,6	2,2
	2-й	5,5	22,8
	3-й	20,6	1,0

Возделывание сельскохозяйственных культур на одном и том же месте (с ежегодным отторжением биомассы) привело к снижению содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве под чечевицей на 48%, под рапсом – на 26%. Чечевица в наибольшей степени очищала почву на 3-й год жизни, тогда как рапс – на второй (табл. 3.2.14.4). Биомассу с повышенным содержанием  $^{137}\text{Cs}$  рекомендуется компостировать и в дальнейшем использовать для удобрения газонов. Разработка способов снижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве вызвана не только получением экологически безопасной продукции, но также тем, что в результате ветровой и водной эрозии происходит расширение площадей сельскохозяйственных угодий с повышенным уровнем радиации.

**Выводы.** В повышении эффективности ризобиального комплекса почва выполняет важнейшие функции (активизации, регулирования, трофическую), благодаря чему активизирует процессы фотосинтеза, регулирует процессы минерализации – иммобилизации и потребления растениями почвенного азота.

Высокой азотфиксирующей способностью отличаются черноземные почвы, отличающиеся повышенным содержанием гумуса и азота, а также большим разнообразием сообщества населяющих микроорганизмов. Активность ассоциативной азотфиксации почв растет при переходе от северных широт к южным. В природных условиях северных широт бобовые растения являются первенцами освоения малоплодородных почв, обогащая их азотом и органическим веществом.

На черноземе горох активнее фиксировал азот симбиотическим путем по сравнению с дерново-подзолистой почвой. Инокуляция увеличивала, а минеральные удобрения снижали фиксацию азота горохом. Активизация процессов фотосинтеза усиливает деятельность микроорганизмов-азотфиксаторов, обеспечивая приток подвижных форм азота к корням растений.

Повышенная концентрация  $\text{CO}_2$  в воздухе стимулирует развитие процессов фотосинтеза и азотфиксации. При увеличении содержания  $\text{CO}_2$  в воздухе возрастает поток фотоассимилятов в клубеньки сои, при этом растет масса клубеньков и азотфиксирующая способность. Интенсивность выделения  $\text{CO}_2$  почвой усиливается при внесении органических удобрений, в том чис-

ле растительных остатков. При разложении остатков бобовых культур выделяется больше  $\text{CO}_2$  по сравнению с остатками злаковых. Растительные остатки стимулируют развитие процессов азотфиксации.

Размеры азотфиксации бобовыми растениями изменяются в зависимости от погодных условий. При недостатке влаги снижается фиксация азота горохом. Оптимальной влажностью почвы для азотфиксации являются 40–80% от полной полевой влагоемкости. При недостатке влаги уменьшаются численность и масса клубеньков, падает нитрогеназная активность. В засушливый период люцерна больше фиксировала азота по сравнению с клевером.

По мере роста влажности почвы увеличивается азотфиксация бобовыми растениями. Однако при избытке влаги в ней замедляется формирование клубеньков на корнях и снижается активность процессов азотфиксации.

Бобовые растения относятся к экологической группе мезофитов. По мере снижения засухоустойчивости они делятся на три группы: первая (наиболее устойчивая) – нут, чина, чечевица, донник, люцерна; вторая – чечевица, фасоль, вика, люцерна синяя; третья – горох, соя, бобы, маш. Устойчивость к засухе различных видов определяется биологическими, морфологическими, физиологическими и биохимическими свойствами. В основе адаптации к засухе лежит способность растений переключать путь усвоения  $\text{CO}_2$  с  $\text{C}_3$ -пути на САМ-путь. Устойчивость растений к засухе повышают специфические стрессовые белки. Наибольшей устойчивостью к засухе обладают хлоропласты, поэтому при засухе интенсивность процессов фотосинтеза падает несколько медленнее. Засухоустойчивые виды отличаются высокой способностью цитоплазмы удерживать воду. Соблюдение технологий выращивания и выполнение мероприятий по сохранению влаги в почве повышают засухоустойчивость бобовых растений.

Оптимальной температурой для симбиотической азотфиксации в зоне умеренного климата считается 24 °С. При температуре ниже 10 °С и выше 30 °С усвоение азота атмосферы клубеньковыми бактериями прекращается. При повышенной температуре и высокой влажности усиливаются процессы нитрификации азота в почве, что ведет к снижению азотфиксации у гороха. При высокой температуре (свыше 30 °С) бобовые растения лучше используют минеральный азот почвы, но снижают в 2,5–3 раза азотфиксацию. Бобовые растения способны фиксировать азот при 0 °С и температуре 42 °С.

Для ассоциативной азотфиксации оптимальна температура 20–30 °С. Ограничивающим азотфиксацию условием считается температура ниже 7 °С, поэтому в средней полосе препятствующим азотфиксации фактором является влажность почвы.

Наиболее благоприятная температура для фиксации азота бобовыми в регионе с умеренным климатом – 24 °С. Клубеньковые бактерии обладают большей устойчивостью к низким температурам по сравнению с растением-хозяином. Оптимальные условия для ассоциативной фиксации ими азота складываются при температуре 20–30 °С.

Большинство бобовых растений лучше растут и развиваются на нейтральных почвах, исключением является люпин, растущий при рН 4,0–5,0. Клевер луговой через корни выделяет ионы водорода в почву, меняя рН.

Клубеньки на бобовых растениях лучше формируются при рН 6,5–7,0. При рН менее 3 нарушается структура цитоплазмы клеток корня. При рН 8,7 растения испытывают дефицит  $\text{NO}_3^-$ , фосфатов, железа, марганца, меди, цинка. В кислых почвах избыток алюминия подавляет поглощение клетками корня фосфора, кальция, калия, железа, натрия, бора.

Бобовые растения чувствительны к содержанию ионов алюминия в почве. У чувствительных к алюминию сортов гороха подавляется поглощение элементов питания; тормозится синтез лектина, гемицеллюлозы и целлюлозы клеточных стенок корня; снижается проницаемость воды через мембраны; уменьшается количество SH-групп в клетке; подавляется активность ферментов.

В кислой среде у клевера тормозится рост, слабо формируются клубеньки, снижается азотфиксация. Чем выше кислотность, тем труднее усваивается почвенный магний. При недостатке магния снижается активность процессов фотосинтеза, резко падает скорость транспортировки сахаров в корни и клубеньки, фиксация азота останавливается, листья желтеют и опадают.

Для бобовых растений важно соотношение Ca:Mg. Совместное внесение кальция и магния улучшает урожай биомассы растений, снижает формирование клубеньков у люпина и повышает – у бобов. Разная реакция растений связана с тем, что бобы, клевер и фасоль относятся к группе кальциефилов, тогда как люпин – кальциефоб. Высокой эффективностью отличается применение отхода свеклосахарного производства – дефеката, кальцийсодержащего удобрения. Снижение кислотности повышает содержание леггемоглобина в клубеньках, растет их масса, а фиксация азота увеличивается в 3–4 раза.

Бобовые растения лучше растут и развиваются на почвах с нейтральным рН; исключение составляет люпин. Бобовые растения чувствительны к содержанию ионов алюминия. Кальций и магний стимулируют развитие азотфиксирующего комплекса у кальциефилов и подавляют его у кальциефобов.

Солеустойчивость бобовых растений зависит от биологических особенностей культуры и почвенно-климатических условий их выращивания. Злаковые культуры отличаются более высокой солеустойчивостью по сравнению с бобовыми растениями. Сорты бобов и фасоли, произошедшие из западноазиатских регионов, отличаются высокой солеустойчивостью. Скороспелые сорта бобовых культур характеризуются большей солеустойчивостью, чем позднеспелые. Солеустойчивые сорта менее интенсивно поглощают соли корнями. Поглощенный хлор накапливается в основном в цитоплазме клеток.

Основной причиной негативного действия засоления является подавление общего уровня обмена веществ и, как следствие, снижение поступления элементов питания. При засолении изменяется состояние воды в клетке – растет доля прочно связанной; повышается осмотический потенциал клеточного сока.

При засолении подавляются процессы фотосинтеза: растет доля аминокислот и падает доля органических кислот и сахаров; тормозится транспорт продуктов фотосинтеза, в результате чего замедляется синтез белков и крахмала.

При засолении тормозится поглощение минерального азота клетками корня и снижается редукция нитратов вследствие подавления активности нитратредуктазы. При засолении окислительно-восстановительная способность смещается в сторону окисления. При этом снижаются активность ДНК и интенсивность включения  $^{32}\text{P}$  во фракцию нуклеиновых кислот.

Наиболее токсичным для ризобий является сульфатно-содовое засоление. К неустойчивым к засолению относятся фасоль, клевер; к устойчивым – лядвенец рогатый, люцерну, донник. У более чувствительного к засолению сорта ответные реакции, ведущие к неблагоприятным физиологическим изменениям (количество свободного пролина), проявляются быстрее и более резко выражены.

Использование засоленных почв становится возможным после проведения комплекса мелиоративных мероприятий. Однако лучшей из культур-освоителей является люцерна благодаря развитию мощной корневой системы, обогащающей почву органическим веществом и азотом.

Среди бобовых растений отсутствуют типичные галофиты, солеустойчивые виды отличаются менее интенсивным поглощением солей. При засолении подавляются процессы и транспорт продуктов фотосинтеза, тормозится редукция  $\text{NO}_3^-$ , снижается синтез белков вследствие падения функциональной активности ДНК и РНК. Выявлена солеустойчивость на генотипическом уровне.

В числе важнейших особенностей бобовых растений – способность аккумулялировать азот атмосферы в естественных условиях окружающей среды, а также смена значимости симбиотрофного и автотрофного способов усвоения азота в ходе онтогенетического развития. Клубеньковые бактерии используют азот в связанном виде и могут выдерживать высокие концентрации минерального азота, которые губительны для самого растения. Азот в больших концентрациях не снижает вирулентность и симбиотическую активность клубеньковых бактерий.

Зерно бобовых растений отличается повышенным содержанием азота (2,6–7,7% на сухое вещество). В соломе содержится 0,9–4,3% азота. Для формирования 1 т зерна максимальное количество азота расходует соя (58–82 кг), а минимальное – фасоль (49–59 кг). Для формирования 1 т сена (солома) наибольшее количество азота используют сераделла (28–31 кг), люпин (24–34 кг), люцерна (24–29 кг); минимальное – фасоль (11–15 кг).

С развитием листового аппарата бобовые растения переходят на симбиотрофное питание. В зрелом растении на долю атмосферного азота приходится 70–90%, на долю азота удобрения и азота почвы – 10–30%. Азот удобрения, внесенный локально, стимулирует потребление азота почвы, удобрения и атмосферы растениями. Горох лучше использует нитратную форму азота, бобы – аммонийную. С повышением дозы азотного удобрения растет степень использования азота удобрения бобовыми растениями. Наиболее чувствительны бобовые растения к содержанию минерального азота в почве в начале вегетации. Бобовые используют 36–48% азота минеральных удобрений (среднее 42%). Наибольшее количество азота удобрения усваивают горох (45–59% от применяемой дозы) и бобы (48–58%), минимальное количество – вика, люцерна и фасоль (32–38%). При выращивании бобовых

растений в почве закрепляется и теряется азота удобрения меньше по сравнению со злаковыми. Различные культуры севооборота в течение двух лет используют 20–25% азота растительных остатков бобовых. При внесении фитомассы клевера (меченной  $^{15}\text{N}$ ) усиливается в 1,5 раза усвоение возделываемой культурой азота почвы.

Яровая пшеница и овес за 60 дней вегетации использовали 12% биологического азота, накопленного в почве в результате ассоциативной азотфиксации; его потери достигают 20–30%. Инокуляция усиливает использование биологического азота. За счет ассоциативной азотфиксации доля атмосферного азота в биомассе растений составляет 20% от общего потребления азота. При применении высоких доз азотных удобрений активность ассоциативной фиксации азота падает.

Солома злаковых культур снижает использование азота кальциевой селитры люпином вследствие усиления его иммобилизации; потери азота удобрения при этом уменьшаются на 13%. Наиболее эффективно потери азота удобрения снижаются в последствии соломы. При этом возрастает симбиотическая азотфиксация.

При внесении соломы основное количество ее азота закрепляется в почве; растения используют 2–8% азота соломы, потери ее азота не превышают 7–9%. При внесении азотных удобрений люпин лучше потребляет азот соломы, но снижается иммобилизация, усиливаются газообразные потери ее азота.

По мере развития бобовых растений доля минерального азота (почвы, удобрения) снижается, а доля атмосферного азота возрастает. С повышением дозы азотных удобрений доля азота атмосферы в растении снижается почти в два раза. Применение азотных удобрений на слабокультуренной почве повышает фиксацию азота клевером, тогда как на хорошо окультуренной – снижает ее. Повышение плодородия почвы не приводит к существенному подавлению азотфиксации клевера. Эффективность действия азотных минеральных удобрений на азотфиксацию бобовыми растениями зависит от запасов минерального азота в почве, его доступности и азотминерализующей способности почвы. С повышением доз азотных удобрений азотфиксация у неинокулированной люцерны падала в 2,2 раза, тогда как у инокулированной – в 1,8 раза. Азотные удобрения снижали продуктивность у сорта клевера ВИК-7 на 20–23%, тогда как у сорта Тетраплоидный ВИК – только на 4–6%.

При локальном применении азотных удобрений азотное питание растений смещается в сторону аммонийной формы. Азотные удобрения, внесенные локально, повышают потребление бобово-злаковыми травами азота удобрения и азота почвы, при этом усиливается использование дополнительного азота почвы и симбиотического азота.

Особенностью бобовых растений является смена значимости симбиотрофного и автотрофного способов усвоения азота в ходе энтогенеза. Для формирования 1 т зерна бобовые культуры расходуют 50–80 кг азота, 1 т сена – 10–30 кг. Бобовые растения используют 36–48% азота минеральных удобрений. При применении высоких доз азотных удобрений активность симбиотической и ассоциативной азотфиксации снижается. Солома

злаковых культур снижает использование азота удобрения и повышает фиксацию азота бобовыми. А азотные удобрения, внесенные локально, повышают потребление ими азота удобрения, азота почвы и симбиотического азота.

Фосфор участвует в процессах синтеза и обмена: нуклеиновых кислот и липидов, энергетических соединений, клеточных белков, запасных форм элемента. Важность и необходимость фосфора в питании бобовых растений связана с его многочисленными реакциями в биоэнергетике азотфиксации.

Тройной симбиоз (симбиотический, ассоциативный, микоризный) бобовых растений имеет целый ряд преимуществ при их возделывании: перевод труднорастворимых фосфатов в лабильные соединения; перекачка фосфатов из глубоких в верхние слои почвы; повышение коэффициента использования фосфора ранее внесенных фосфорных удобрений; снижение потерь фосфора за пределы агрофитоценоза.

Люпин, люцерна, клевер и соя расходуют наибольшее количество фосфора (18–21 кг  $P_2O_5$ /т) на формирование урожая 1 т зерна, минимальное – бобы, вика, сераделла, чечевица (11–12 кг  $P_2O_5$ /т). Эти же культуры используют максимальное количество фосфора на формирование 1 т сена.

Продуктивность люцерны увеличивается с повышением уровня подвижных фосфатов до 50–60 мг  $P_2O_5$ /кг карбонатного чернозема. Дальнейшее повышение содержания подвижных фосфатов в почве сопровождается снижением фитомассы люцерны. Люпин хорошо использует последствие фосфорных удобрений, а также фосфор фосфоритной муки и фосфогипса.

При повышенном содержании подвижных фосфатов в почве и увеличении доз фосфорных удобрений до 90 кг  $P_2O_5$ /га снижалась азотфиксация у сераделлы. Наибольшей азотфиксирующей способностью сераделла отличалась при совместном применении фосфорных и калийных удобрений (по 90 кг/га). При недостатке фосфора в почве снижаются биомасса клубеньков и содержание в них леггемоглобина. С повышением количества доступного фосфора в почве возрастают биомасса клубеньков и содержание леггемоглобина. Оптимальный индекс содержания подвижного  $P_2O_5$  колеблется в широких пределах (30–120 мг/кг).

Для формирования урожая зерна бобовые растения расходуют 15–53 кг  $K_2O$ /га, сена (соломы) – 8–31 кг  $K_2O$ /т. Наибольшее количество калия на формирование 1 т зерна (свыше 40 кг/т) расходуют нут, люпин, сераделла, соя, минимальное количество (15 кг/т) – вика. Максимальное количество калия на формирование 1 т сена расходуют: нут, люпин, сераделла, минимальное – вика, горох.

Наибольшей азотфиксации люпин достигал при внесении 60–90 кг  $K_2O$ /га; дальнейшее повышение доз калийных удобрений снижало ее эффективность. На почве с низким уровнем плодородия эффективность действия калия на фиксацию азота снижается. При низкой обеспеченности растений подвижным калием уменьшаются биомасса клубеньков и содержание леггемоглобина. Повышение количества подвижного калия до 158 мг  $K_2O$ /кг усиливало образование клубеньков и накопление леггемоглобина у люцерны. Увеличенные дозы калийных удобрений повышают фиксацию азота у люцерно-злаковой травосмеси и снижают ее – у клеверозлаковой.

Бобовые растения нуждаются в полном минеральном удобрении на начальных этапах роста до формирования фотосинтетического аппарата, особенно на легких малоплодородных почвах. Полное минеральное удобрение вносится при выращивании бобовых растений под покровную культуру, а также при возделывании многолетних бобово-злаковых травосмесей.

При повышенном уровне минерального азота в почве задерживается формирование клубеньков и снижается активность нитрогеназы. Бобовые легко переносят низкую обеспеченность почвы подвижными формами фосфора и калия ввиду их способности усваивать труднорастворимые соединения элементов питания, чему также способствует микориза на корнях. Бобовые растения также хорошо используют элементы питания в последствии органических и минеральных удобрений.

Наиболее эффективно на биомассу клубеньков и фиксацию азота сераделлой действовали калийные удобрения. Однако наибольший урожай сена сераделла формировала при внесении полного минерального удобрения ( $N_{60}P_{90}K_{90}$ ). Даже в условиях дерново-подзолистых песчаных почв азотные удобрения в составе полного минерального удобрения снижают биомассу клубеньков и азотфиксацию у сераделлы. В засушливый год действие азотных удобрений на азотфиксацию усиливается у люцерны. Наибольший урожай зерна горох формировал по вспашке и внесении полного минерального удобрения ( $N_{50}P_{70}K_{40}$ ). Минимальная обработка почвы снижала продуктивность гороха и содержание сырого белка в зерне. При внесении полного минерального удобрения ( $N_{42}P_{91}K_{91}$ ) сорта гороха формировали наибольший урожай зерна (38–41 ц/га). При внесении второй дозы удобрения ( $N_{97}P_{104}K_{104}$ ) урожай сортов гороха снизился на 1ц.

Полное минеральное удобрение усиливало азотфиксацию травосмеси козлятника с клевером и тимофеевкой в соотношении 50:25:25 и не влияло на нее при соотношении 25:50:25. Полное минеральное удобрение повышало продуктивность травосмеси козлятника на 12–13%, а травосмеси люцерны – на 5–26% по сравнению с контролем.

При локальном внесении полного минерального удобрения горох лучше использует азот удобрения, его меньше закрепляется в почве и теряется в виде газообразных соединений. При локальном внесении одного азотного удобрения, несмотря на лучшее использование азота удобрения растениями, урожай зерна гороха не повышается.

На низкоплодородных почвах под бобовые культуры вносят полное минеральное удобрение с пониженной дозой азота. Полное минеральное удобрение повышает азотфиксацию травосмеси, в состав которой входит 50% бобового компонента. Эффективным является локальное внесение полного минерального удобрения под горох.

В зависимости от условий произрастания бобовые растения могут испытывать недостаток меди на торфяниках, в молибдене – на кислых почвах, в боре и молибдене – на красноземах, в марганце – на почвах с нейтральным рН, карбонатных и супесчаных. Марганец усиливает подвижность фосфора в почве, а кобальт – подвижность азота. Повышенное количество марганца ядовито для бобовых растений. Недостаток цинка растения испытывают на песчаных, супесчаных и гравийных почвах, а также на карбонатных.

При недостатке бора нарушается обмен нуклеиновых кислот и белков, возрастает проницаемость мембран и накопление алкалоидов, развивается некроз клубеньков. Бор способствует обеспеченности процессов азотфиксации энергетическими соединениями, развитию клубеньков. На кислых почвах бор не действует на процессы азотфиксации. Кобальт участвует в развитии клубеньков и биосинтезе витамина В<sub>12</sub>. Марганец – в окислительно-восстановительных процессах и регуляции активности оксидаз. Медь необходима для синтеза леггемоглобина в клубеньках. Молибден служит индуктором биосинтеза ферментов, участвующих в связывании азота; поддерживает структуру нитрогеназы; необходим для синтеза леггемоглобина; участвует в процессе переноса электронов в процессе превращения азота в аммиак. Цинк влияет на скорость окислительно-восстановительных процессов, на скорость процессов фотосинтеза, на белковый и углеводный обмены.

В бобовых растениях микроэлементы участвуют в важнейших процессах их жизни: развитии клубеньков, синтез леггемоглобина, стабилизируют структуру нитрогеназы, участвуют в биосинтезе ферментов и витамина В<sub>12</sub>, переносе электронов в процессе превращения азота в аммиак, влияют на скорость окислительно-восстановительных процессов, обмена белков и углеводов.

При инокуляции бобовых растений активные штаммы клубеньковых бактерий образуют клубеньки. Окраску клубенькам придает фитоглобин, который в процессе азотфиксации выполняет функцию переносчика кислорода. Инокуляция повышает продуктивность однолетних бобовых растений на 10–25%, способствует уменьшению затрат на применение азотных минеральных удобрений и антропогенную нагрузку на окружающую среду. Азотные минеральные удобрения снижают эффективность инокуляции. Комбинированная инокуляция бактериями и микоризным грибом усиливает поступление биологического, почвенного азота и азота удобрения. Ризосферные псевдомонады способствуют лучшей симбиотической азотфиксации. Инокуляция совместно с молибденовыми и фосфорными удобрениями увеличивает биомассу клубеньков и снижает их количество.

Оптимизация комплементарных пар симбионтов позволяет увеличить формирование клубеньков, повысить нитрогеназную активность и продуктивность бобовых растений. Солома и малые дозы азотных удобрений усиливают азотфиксацию у клевера за счет увеличения биомассы клубеньков. Внесение соломы без последующей инокуляции не влияет на формирование клубеньков. Солома, инокуляция и малые дозы азотных удобрений повышают азотфиксацию у клевера. Наибольшее количество биологического азота клевер накапливает при инокуляции и внесении соломы. С повышением дозы азота азотфиксация неинокулированного клевера подавляется по сравнению с инокулированными растениями. Максимальное количество азота атмосферы поступало при инокуляции семян яровой пшеницы на фоне соломы. Инокуляция семян ячменя снижает иммобилизацию азота удобрения в почве и его газообразные потери. В тоже время биоплант повышает газообразные потери азота удобрения.

Ризоагрин повышает использование азота горчицы (меченной  $^{15}\text{N}$ ) и азота почвы (на 14 и 19% соответственно). Ризоагрин улучшает поступление азота атмосферы в общий его вынос на 12%. Инокуляция семян яровой пшеницы усиливает устойчивость агрофитоценоза.

Техногенное загрязнение окружающей среды носит комплексный характер. При загрязнении почвы тяжелыми металлами (ТМ) происходит инактивация белков-ферментов, нарушаются функции клеточных мембран и их проницаемость, подавляются процессы поглощения, транспорта ионов и воды, процессы дыхания и фотосинтеза, а также фиксации азота, снижается содержание сахаров, жира и клетчатки в тканях растений.

Интенсивность процесса азотфиксации является чувствительным индикатором загрязнения и может быть использована в качестве показателя нормирования тяжелых металлов в почве. Загрязнение почвы и воздуха ТМ подавляет фиксацию молекулярного азота, наибольшую токсичность при этом проявляет кадмий. По скорости поступления в растения тяжелые металлы образуют следующий ряд:  $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Fe}$ .

Накопление ТМ в растениях на кислых почвах идет более интенсивными темпами, чем на почвах с нейтральной реакцией среды. Вика и люпин накапливают большее количество ТМ по сравнению с зерновыми культурами (ячмень, овес) при одном и том же уровне загрязнения почвы.

Большинство тяжелых металлов в органах растений распределяются неравномерно. Одинаковое количество хрома и кадмия содержится в створках и семенах гороха. В 5 раз больше никеля в семенах, в 1,7–2,3 раза в них больше, чем в створках плодов,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Pb}$  и  $\text{Fe}$ .

Для вики наиболее токсичными являются цинк, свинец и кадмий. С повышением уровня плодородия почвы токсичность ТМ снижается. Токсическое действие ТМ связывают с нарушением поступления элементов питания в растения. Медь подавляет поступление калия; никель и кадмий тормозят транспорт азота, фосфора и калия, кальция; цинк снижает поступление фосфора. Токсическое действие ТМ связано с нарушением фосфорного обмена: возрастает доля минерального фосфора в листьях клевера. При загрязнении почвы ТМ уменьшается количество каротина в сене клевера.

Тяжелые металлы в высоких концентрациях расстраивают функции клеточных мембран, подавляют механизм поглощения и транспорта неорганических ионов и воды, инактивируют каталитические и регуляторные функции белков, поражают процессы дыхания, фотосинтеза и фиксацию азота.

Под действием гербицидов в бобовых растениях подавляются функции ядра и митохондрий клетки, поскольку происходят существенные изменения в синтезе белков и фосфорилировании, тормозится энергообмен в процессе дыхания, снижается активность азотфиксирующего комплекса.

Устойчивый к гербицидам сорт люпина Белорусский отличается более высоким содержанием нуклеиновых кислот по сравнению с сортом Боровлянский. Под действием гербицидов у чувствительного сорта активность РНК-азы падает раньше, чем содержание РНК. У чувствительного к гербицидам сорта люпина содержание нуклеиновых кислот снижается значительно сильнее, чем у устойчивого.

Под действием гербицидов у чувствительных сортов содержание белков снижается сильнее; уменьшается включение  $^{35}\text{S}$  и  $^{14}\text{C}$ -лейцина в белки; снижается количество SH-групп в белках и уровня тиолов; повышается концентрация L-кетоглутаровой и пировиноградной кислот и уменьшается количество аминокислот (аспарагиновая, глутаминовая, серин) и сахаров; нарушаются метаболические процессы.

Гербициды подавляют развитие клубеньков, активность нитрогеназы, снижают эффективность нитрогенизации. Высокой токсичностью для клубеньков отличается гербицид дуал для всех видов бобовых, фундазол – для клубеньков бобов конских; нетоксичны для клубеньков бобов впрометрин и базагран. Не влияют на активность нитрогеназы гербициды далапон 2,4,5-Т, бенлат, базистин. ТМТД подавляет нитрогеназную активность, однако в малых дозах стимулирует развитие клубеньков и активность нитрогеназы.

Стратегия применения гербицидов на посевах бобовых растений должна строиться с учетом минимального воздействия на бобово-ризобиальный комплекс. Под действием гербицидов нарушается нуклеиновый, аминокислотный, белковый и углеводный обмен, метаболизм органических кислот. Гербициды подавляют развитие клубеньков и активность нитрогеназы.

При фиксации 100–600 кг  $\text{N}_2/\text{га}$  год доля влияющей генотипа штамма бактерий составляет 24%, доля генотипа растения – 26%, их взаимодействия – 32%. В зависимости от генотипа численность клубеньков на корнях может различаться в несколько раз. От генотипа зависит активность нитрогеназы.

Различные сорта бобовых неодинаково реагируют на одни и те же экологические факторы: одни повышают урожай, другие увеличивают содержание белка в зерне. Потенциальная продуктивность сортов реализуется при избыточно влажной, теплой погоде. Слабая засуха стимулирует накопление белков в семенах, глубокая – подавляет этот процесс. Повышенная влажность также снижает содержание белков в семенах разных сортов сои. Под действием засухи продуктивность люцерны сорта Пастбищная снижается в 2,7 раза, тогда как сорта Селена – в 2,4 раза (по сравнению с нормальным годом).

Инокуляция семян позволяет продвинуть районы возделывания бобовых в северные широты. В этих условиях наибольшую биомассу формирует сорт люпина Снежить; зерно с повышенным содержанием белков – сорт Ипатьевский. Продуктивность сортов клевера определяется неодинаковым потреблением элементов питания. На светло-каштановой почве наибольший урожай биомассы формирует сорт клевера Наследник. Сорт клевера Марс с крупными розовыми клубеньками дает лучший урожай надземной массы по сравнению с сортами с мелкими клубеньками. Суперклубеньковый мутант гороха в смешанном посеве с овсом формирует больший урожай биомассы по сравнению с бесклубеньковым мутантом. Сорт сои Уссурийская 154 уступал по продуктивности сорту Оттава из-за снижения скорости метаболизма  $^{14}\text{CO}_2$  в процессах фотосинтеза.

Повышение продуктивности бобовых культур тесно связано с созданием высокоэффективной сортомикробной системы, максимально адаптированной к природным и антропогенным факторам. Формирование новых сортов

клевера с крупными клубеньками – один из путей повышения эффективности азотфиксации и продуктивности растений.

По относительному накоплению радионуклидов бобовые растения образуют следующий ряд: люпин > вика > горох > бобы, фасоль.

В одинаковых условиях в зеленой массе сераделлы накапливается в 1,3–1,5 раза меньше радионуклидов, чем в биомассе люпина. Оптимальные дозы фосфорных и калийных удобрений существенно снижают накопление радионуклидов в биомассе люпина и сераделлы. Наиболее эффективно фосфорные и калийные удобрения уменьшают содержание радионуклидов в биомассе трав на легких дерново-подзолистых почвах. Содержание радионуклидов в растениях снижается в большей мере при совместном внесении извести и калийных удобрений. Эффективность известкования сохраняется в течение 7–8 лет. Инокуляция симбиотическими штаммами более выражено снижает количество радионуклидов, чем при применении штаммов ассоциативной азотфиксации.

Под действием фосфорных, калийных удобрений и извести существенно снижается накопление радионуклидов в биомассе бобовых трав. Эффективным приемом является подбор сортов с пониженной способностью накапливать радионуклиды. Инокуляция симбиотическими штаммами тормозит накопление радионуклидов бобовыми растениями.

Газоустойчивость бобовых определяют их биологические, анатомо-морфологические и физиолого-биохимические признаки. Так, газоустойчивые растения меньше открывают устьица листьев. По биологическим характеристикам фасоль более устойчива, чем клевер и соя. К  $\text{SO}_2$  наиболее чувствительны люцерна, клевер, фасоль.

По степени токсичности для бобовых растений газы располагаются в следующем порядке:  $\text{F}_2 > \text{Cl}_2 > \text{SO}_2 > \text{NO} > \text{CO} > \text{CO}_2$ .

Токсичные газы нарушают процессы фотосинтеза, усиливаются процессы окисления белков и аминокислот, что вызывает нарушение роста и развития растений. При совместном действии  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$  вследствие негативного влияния на мембраны хлоропласта снижается интенсивность фотосинтеза. Процессы фотосинтеза и дыхания подавляет также фтористый водород. Токсическое действие фтора на горох проявляется в подавлении поглощения элементов питания и активности ферментов. Устойчивость к вредным газам усиливается при улучшении минерального питания растений и известковании. Повышенное содержание  $\text{CO}_2$  снижает повреждаемость растений  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}$ .

Эрозия почвы затрагивает глубинные процессы трансформации и круговорота веществ в агрофитоценозе, потребления и метаболизма азота удобрения, азота почвы и атмосферного азота. Многолетние бобово-злаковые травы (клевер, тимофеевка) потребляют наибольшее количество азота на приводораздельной части склона, наименьшее – в нижней части. Локализация азотных удобрений усиливает потребление азота удобрения, азота почвы и атмосферного азота травосмесью. В условиях эрозийного агроландшафта многолетние бобово-злаковые травы лучше использовали азот удобрения, больше его закреплялось в почве, меньше терялось по сравнению с зерновыми культурами.

При выращивании бобово-злаковых трав во всех циклах азота участвует азот атмосферы: потребление атмосферного азота растениями, иммобилизация его в почве снижаются от водораздела к нижней части склона, а газообразные потери, наоборот, растут. При локальном внесении азотного удобрения потребление атмосферного азота травами повышалось, а его иммобилизация и потери существенно снижаются по сравнению с разбросным способом применения. Локализация азотного удобрения усиливает рециркуляцию азота (РИ:М), что повышает экологическую устойчивость агрофитоценоза.

Фитомасса бобовых сидератов является важным источником органического вещества и биофильных элементов. Кроме гумусовоспроизводящей функции, фитомасса бобовых служит средообразующей и энергетической основой жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, осуществляющих минерализационно-иммобилизационные превращения азота и его соединений.

Потребление азота фитомассы бобовых и злаковых трав (меченных  $^{15}\text{N}$ ) овсом зависит от формы источника и степени эродированности почвы. Наибольшее количество азота овес использует при внесении фитомассы клевера, наименьшее – биомассы тимофеевки. Эрозия почвы снижает степень использования овсом азота бобовых и злаковых трав. Овес также потребляет наибольшее количество азота почвы при внесении биомассы клевера. Лучшее использование азота биомассы клевера и азота почвы позволяет овсу формировать наибольший урожай зерна. При внесении органических удобрений – биомассы трав в почву происходит ее разложение с освобождением минерального азота, который не накапливается, поскольку используется возделываемой культурой, подвергается иммобилизации в почве и теряется в виде газообразных соединений. Наибольшее количество азота удобрения закрепляется в почве при внесении фитомассы тимофеевки (С:N=27), наименьшее – фитомассы клевера (С:N=19). В нижней части склона иммобилизация азота фитомассы трав снижалась: у клевера – в 1,1 раза, у люпина и тимофеевки – в 1,2 раза.

Наименьшее количество азота теряется при внесении фитомассы клевера в почву приводораздельной части склона – 8% от применяемой дозы; 25% – в нижней части склона. Наибольшее количество азота терялось при применении фитомассы тимофеевки.

Эрозия изменяет интенсивность мобилизационно-иммобилизационно-го цикла азота в почве, связанного с активностью почвенной микрофлоры. Включение азота фитомассы многолетних трав в микробную биомассу (временная иммобилизация) имеет важное агроэкологическое значение, поскольку снижает размеры его газообразных потерь. При отдельном внесении фитомассы клевера и тимофеевки включение  $^{15}\text{N}$  в микробную биомассу в эродированной почве уменьшается в 1,5 и 1,7 раза соответственно (по сравнению с незэродированной почвой), тогда как при совместном внесении их фитомассы – в 1,2 раза.

В дерново-подзолистой почве закрепляется больше азота многолетних трав по сравнению с азотом минеральных удобрений. При внесении в почву фитомассы клевера наибольшее количество его азота включается во фрак-

цию I гуминовых кислот и фракцию Ia фульвокислот, а также негидролизуемого остатка. Под действием эрозии снижается включение азота многолетних трав в фульвокислоты (фракция I). Активная иммобилизация азота тимофеевки обусловлена большим включением меченого азота в менее подвижные фракции органического вещества почвы.

На склоновых землях многолетние бобово-злаковые травы выполняют средообразующую функцию, защищая почву от эрозии и предотвращая загрязнение природных вод. Многолетние травы являются основой агромелиоративного почвозащитного комплекса специализированных севооборотов. При выращивании многолетних трав потери гумуса и элементов питания снижаются с твердым стоком примерно в 10 раз по сравнению с озимыми культурами.

Атмосферный азот, фиксированный клевером, участвует во всех циклах круговорота азота в агроэкосистеме. Эрозия почвы снижает потребление растениями, иммобилизацию в почве симбиотического азота и повышает его газообразные потери.

Почвенные микроорганизмы лучше используют  $^{15}\text{N}$  фитомассы клевера. Эрозия почвы замедляет интенсивность включения азота фитомассы трав в биомассу микроорганизмов и повышает газообразные потери их азота.

Скорость разложения и характер включения азота трав в органическое вещество почвы зависит от состава травостоя. Азот клевера в большей степени включается в легкоподвижные фракции гуминовых кислот, азот тимофеевки – в легкоподвижные фракции фульвокислот.

Устойчивость бобовых растений к биотическим факторам связана с особенностями их роста и развития, местом, занимаемым в севообороте, требованиями к почвенным и погодным условиям, взаимоотношениями с микроорганизмами и сорняками, подверженностью воздействию вредителей и болезням. Взаимоотношения с сорняками определяются видовым составом и темпами роста. От негативного действия сорняков потери урожая бобовых растений составляют 22–70%. В большей степени сорняки подавляют смешанные посевы (вико-овес, соя – подсолнечник). В то же время в чистых посевах клевера лугового численность сорняков снижается в два раза по сравнению со смешанными. Медленный рост сои является причиной высокой засоренности ее посевов.

Высокую устойчивость к вредителям и болезням бобовым растениям обеспечивает наличие в их тканях специфических соединений. Воздействуя на патоген, бобовые сидераты снижают поражение злаковых культур корневыми гнилями, злаковыми блошками и шведской мухой. Биомасса люпина снижает заболеваемость клубней картофеля паршой и ризоктонией, поражение нематодой.

Различные виды азотфиксирующих микроорганизмов синтезируют ростовые вещества, повышают иммунитет растений, обеспечивают их устойчивость к низким положительным температурам и дефициту влаги. Устойчивость бобовых растений к биотическим факторам развивается на уровне ризосферных микроорганизмов. Дазотрофные бактерии снижают поражение злаков мучнистой росой, сахарной свеклы церкоспорозом, повышают устойчивость амаранта к эпифитным грибам.

Для конкурентных штаммов характерна генетическая близость к растению-хозяину. Высокая конкурентная способность штамма на одном сорте существенно снижается на другом сорте этого же вида. Нитрагин не дает ожидаемого эффекта, если количество спонтанных микроорганизмов существенно превосходит количество его штаммов.

В смешанных посевах растения-доноры, выделяя через корни продукты метаболизма, создают внешний гомеостаз, обеспечивают условия для роста и развития других организмов-акцепторов, через корневую систему выделяют органические и неорганические соединения, участвующие во внутриклеточном обмене. Выделение веществ корнями является активным процессом и осуществляется системой переносчиков. Кормовые бобы могут выделить в почву до 15% симбиотического азота. Растения-акцепторы способны использовать 17–39% меченого азота донора. Райграс может накапливать до 79% азота, фиксированного клевером, а растения кукурузы – 52% азота вигны. Злаки накапливают 63% своего азота за счет люцерны и 79% за счет лядвенца. Идет и обратный процесс: азот небобового компонента поступает и в бобовые растения. В смешанных посевах злаковые культуры играют роль защитного компонента (барьерный эффект при вторичном заражении и распространении инфекции). Они снижают поражение люпина серой гнилью, узколистного–антракнозом. В присутствии злаков повышается коэффициент азотфиксации. Потребление азота почвы и азота удобрения (меченными  $^{15}\text{N}$ ) растениями зависит от соотношения компонентов в агрофитоценозе. Под действием бобового компонента в злаках повышается содержание белков.

Изменение видового разнообразия в агрофитоценозе лежит в основе разработки мер по управлению экологически безопасным круговоротом азота, снижению антропогенной нагрузки минерального азота (удобрений) на систему.

Взаимоотношения бобовых растений с сорняками определяются их видовым составом и темпами роста. От негативного действия сорняков потери урожая бобовых составляют 22–70%. В смешанных посевах между бобовыми и злаковыми растениями происходит взаимный обмен азотом и другими веществами-метаболитами. Злаковые выполняют функцию защитного барьера для фитопатогенов, поражающих бобовые. Злаки повышают коэффициент азотфиксации бобовых растений. Использование последних в качестве покровных культур снижает дефицит азота в почве в ранневесенний период за счет азота пожнивно-корневых остатков.

Негативные экологические последствия в экосистемах наблюдаются в результате нарушений технологий использования земель, выращивания сельскохозяйственных культур и содержания сельскохозяйственных животных.

Одним из эффективных приемов реабилитации почв, загрязненных отходами животноводства, является введение в севооборот культур интенсивного типа (люпин, люцерна, клевер, донник, сераделла, эспарцет), в урожае которых накапливается 200–400 кг N/га. Особенность состоит в том, что, потребляя большое количество азота, бобовые травы не накапливают нитраты в биомассе. Кроме того, микроорганизмы ризосферы обладают высокими санирующими свойствами в отношении к патогенной микрофлоре.

Бобовые растения успешно используют для реабилитации загрязненных тяжелыми металлами почв вблизи рудников, шахт, предприятий цветной и черной металлургии, химии и нефтехимии, отвалов и свалок. В посевах бобовых культур сорняки выполняют функцию фитопротекторов.

Ряд бобовых растений (люпин узколистый, чечевица, рапс) отличается способностью накапливать повышенное количество радионуклидов. Фосфорные и калийные удобрения усиливают потребление радионуклидов люпином. При сухой погоде чечевица и рапс содержат большее количество  $^{137}\text{Cs}$ . Возделывание бобовых растений на одном месте в течение длительного времени (с ежегодным отторжением фитомассы) уменьшает концентрацию  $^{137}\text{Cs}$  в почве под чечевицей на 48%, под рапсом на 26%. Чечевица в наибольшей степени очищает почву на третий год жизни, рапс – на второй. Реабилитация загрязненных радионуклидами почв вызвана и тем, что в результате водной и ветровой эрозии расширяются площади сельскохозяйственных угодий, а также повышенным уровнем радиации.

Бобовые растения используют для реабилитации почв, загрязненных отходами животноводства, тяжелыми металлами, радионуклидами, при залужении отвалов вскрышных пород при добыче полезных ископаемых. Бобовые фитопротекторы снижают содержание  $^{137}\text{Cs}$  в почве на 26–48%.

## Глава 4. Экологически безопасная продукция бобовых растений

Значимость бобовых состоит в том, что качество их продукции формируется за счет биологического экологически безопасного азота, она отличается низким уровнем накопления нитратов в зерне и зеленой массе.

Дефицит белка – одна из наиболее острых проблем на сегодня. Недостаток белка в питании человека достигает 22%, в рационе сельскохозяйственных животных – 20% (1,8 млн т) (Савченко и др., 2009; Котлярова и др., 2012; Головина, Агаркова, 2017; Шевцова и др., 2017). Для синтеза 1 кг животного белка необходимо использовать 7,5–8 кг растительного; при этом в 1 кормовой единице должно содержаться 110–115 г переваримого белка. Из-за дефицита белка растут затраты кормов на единицу животноводческой продукции (мяса, молока). Увеличение производства кормов и улучшение их качества – важнейшие условия развития высокопродуктивного животноводства.

### 4.1 Качество урожая отдельных культур

На современном этапе развития сельскохозяйственного производства бобовые растения следует рассматривать как универсальные культуры, обладающих высоким пище-и кормопродукционным потенциалом. Эколого-агрохимические основы оптимизации качества урожая бобовых включают в систему агротехнологий, максимально адаптированных к почвенным и экологическим условиям. Качество урожая – это комплекс признаков и свойств, который зависит от видовых и сортовых особенностей культуры, места ее в севообороте, условий выращивания, сроков и способов уборки, условий хранения и переработки (табл. 4.1.1).

Таблица 4.1.1 – Качественный состав зерна бобовых растений

Культура	Содержание веществ, % на сухое вещество					
	сухое вещество	белок	жир	БЭВ	клетчатка	зола
Вика	85–88	25–34	1,5–3,0	48–54	4,5–6,6	2,7–4,0
Горох	85–90	16–35	1,3–1,5	48–55	3,0–6,0	2,0–3,1
Люпин	82–86	30–48	3,6–8,0	18–21	11,0–18,0	2,5–3,5
Соя	84–86	20–55	13,0–26,0	19–30	2,9–11,0	4,5–6,8
Фасоль	85–88	22–30	2,0–3,0	45–52	3,0–5,5	2,5–5,0

Усвояемость жвачными животными питательных веществ бобово-злаковых трав составляет, %: белков – 65–80; безазотистых экстрактивных веществ – 72–80; клетчатки – 60–70; жиров – 60–70.

Благодаря азотфиксации бобовые растения формируют мощный белковый комплекс зерна и вегетативных органов (табл. 4.1.2). В зерне – свыше 30%, а в вегетативных органах – более 20% белков. Рекордсменами являются соя и люпин: в их зерне 55 и 48% белка соответственно.

Стоимость белков бобовых растений в 2–3 раза ниже, чем белков злаковых культур (Мишустин, Черепков, 1976; Вавилов, Посыпанов, 1983). Около 20% населения России страдает от дефицита белков и аминокислот в рационе. Именно эту проблему могут решить бобовые растения как непосредственную (продукты питания), так и опосредованно (кормление животных высокобелковыми полноценными кормами).

Таблица 4.1.2 – Содержание белка в бобовых растениях

Бобовые растения	Белок, %
Бобы	25–36
Вика посевная	17–34
Горох	20–35
Донник	18–21
Клевер луговой	20–23
Козлятник восточный	16–25
Люпин многолетний	18–20
Люпин однолетний	35–48
Люцерна посевная	19–21
Лядвенец рогатый	21–25
Нут	22–26
Сераделла	15–17
Соя	28–55
Фасоль	17–30
Чечевица	18–30
Чина	15–18
Эспарцет	18–20

Белковый комплекс семян бобовых растений представлен белковыми фракциями, различающимися по растворимости, молекулярному весу, аминокислотному составу, ферментативной активности. В белковом комплексе семян бобовых культур основную долю занимают альбумины и глобулины (70–80%), в семенах злаковых – проламины и глютелины (60–70% от общего азота). В зерне бобовых проламинов нет (табл. 4.1.3).

Таблица 4.1.3 – Фракционный состав белкового комплекса семян бобовых и злаковых растений

Культура	Азот фракции, % общего азота				Неэкстрагируемый остаток, %
	альбумины	глобулины	проламины	глютелины	
Горох	15,5	53,8	-	12,8	7,9
Соя	15,7	55,9	-	11,4	7,0
Фасоль	14,7	52,3	-	13,5	8,1
Пшеница	4,8	10,0	35,4	23,6	15,2

Из семян бобовых культур выделено большое число глобулинов, каждый вид которых получил свое название: у гороха это леулины и вицилины (70–80% в расчете на белковый азот); у сои – глицин (60–70%); у фасоли – фазеолин (80–90%); у люпина –  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -конглотины (60–70%).

Полноценность питания определяется содержанием аминокислот (в том числе незаменимых) в белках продуктов питания и кормов.

Таблица 4.1.4 – Содержание аминокислот в различных белках, % (Новиков, 2004)

Аминокислоты	Зерно мягкой пшеницы	Леулин сои	Казеин молока	Эталон ФАО
Аланин	3,8	3,4	3,5	-
Аргинин	4,4	7,0	4,0	-
Аспарагиновая кислота	5,3	12,2	7,2	-
Валин	4,5	4,3	6,2	4,2
Гистидин	2,4	2,3	3,2	-
Глицин	4,1	3,6	1,9	-
Глутаминовая кислота	30,4	20,8	15,0	-
Изолейцин	2,9	5,1	6,6	4,2
Лейцин	7,2	6,3	9,9	4,8
Лизин	2,8	4,2	6,6	4,2
Метионин	1,4	1,3	2,4	2,2
Пролин	10,7	4,9	8,6	-
Серин	4,2	6,5	5,9	-
Тирозин	2,6	3,9	5,1	-
Треонин	2,8	4,5	4,6	2,8
Триптофан	1,4	1,4	1,4	1,4
Фенилаланин	4,3	4,9	4,9	2,8
Цистин (цистеин)	2,2	1,4	0,8	-

Белки зерна сои отличаются повышенным содержанием аргинина, аспарагиновой кислоты, лейцина, изолейцина, лизина и пониженным – метионина (табл. 4.1.4). В них повышенное количество валина, лейцина, изолейцина, треонина и фенилаланина по сравнению со стандартом ФАО. Кроме того, в белках сои содержится больше аргинина, аспарагиновой кислоты, лейцина, изолейцина, лизина, серина, тирозина, треонина и фенилаланина по сравнению с белками зерна мягкой пшеницы (Новиков, 2004).

Качество урожая является интегральным отражением локального, регионального и глобального состояния окружающей среды и результатом антропогенного воздействия на агроэкосистемы в сложной комбинации с природными факторами. Поэтому качество продукции определяется такими основными признаками, как пищевая, кормовая ценность и безопасность. Полный набор питательных веществ в продукции может свести на нет пищевую ценность из-за чрезмерного накопления в ней загрязняющих веществ природного и антропогенного происхождения. Задача – получение экологически безопасной продукции.

Качество урожая бобовых культур является строго индивидуальным, комплексным и интегральным показателем, отражающим взаимодействие и воздействие множества факторов на поступление, усвоение, метаболизм

и накопление элементов питания и их соединений в конкретных почвенно-климатических условиях.

**Бобы** выращивают как пищевую и кормовую культуру. В зерне содержится 25–36% белка; на одну кормовую единицу приходится 200 г переваримого белка, что больше, чем в горохе. В составе также 1,8% жира, 46% БЭВ. Белок бобов отличается содержанием аминокислот, %: тирозина – 3,15; триптофана – 1,30; лизина – 2,22; аргинина – 8,05; гистидина – 2,56; цистина – 0,86; метионина – 1,58. Высокими кормовыми свойствами характеризуется зеленая масса бобов; на каждую кормовую единицу – 130–140 г белка, то есть в 1,5–2 раза больше, чем в зеленой массе кукурузы. Количество белка в семенах бобов изменяется в пределах 20,2–39,5%, в зеленой массе – 8,8–28,5%.

При посеве бобов вместе с кукурузой получают силосную массу, сбалансированную по белку. Белки бобов отличаются высокой растворимостью, переваримостью и усвояемостью.

В незрелых семенах и зеленой массе бобов содержится значительное количество витаминов А, в и С (56,3 мг%). Бобы являются хорошим медоносом, с которого пчелы собирают 15–30 кг/га меда.

**Викю** возделывают как пищевую и кормовую культуру. Зеленая масса и сено вики (в чистом виде или в смеси с овсом) содержит 15% сырого белка (4,5–5% лизина от общего количества белка). В 100 кг зеленой массы вики – 16 кормовых единиц и 56–79 г каротина. В сене вики – 19% сырого белка, 23–27% клетчатки, 1,1–2,3% кальция и 8–9% золы. В 100 кг зерна вики содержится 116 кормовых единиц, сырого белка – 20 кг, в связи с чем в дробленном виде используется для приготовления концентрированного корма.

Применение фосфорных и калийных удобрений в дозе  $P_{60}K_{90}$  на дерново-подзолистой почве снижало содержание белка в зерне вики на 0,9% (Кукреш, 1991). Внесение на этом фоне азотных удобрений (30 кг N/га) повышало количество белка на 0,8% (при контрольном показателе 23,9%).

Зерно и зеленая масса вики имеют горьковатый вкус, обусловленный наличием гликозида вицианина (Кукреш, 1989, 1991). Из-за него в суточном рационе жвачных животных доля вики ограничена до 10–14%. При гидролизе вицианина высвобождается синильная кислота. В семенах вики может накапливаться до 8–10 мг/100 г этого ядовитого вещества. В настоящее время выведены новые сорта вики с низким содержанием вицианина.

В смешанных посевах с викой доля азота пшеницы увеличивалась на 0,12–0,25% по сравнению с монопосевом. Это обеспечило формирование зерна пшеницы с более высоким содержанием сырого белка (табл. 4.1.5).

Таблица 4.1.5 – Содержание сырого белка в зерне яровой пшеницы и вики в одновидовом и смешанных посевах, % (Пасынкова, 2009)

Состав агрофитоценоза	Сырой белок	
	яровая пшеница	вика
Пшеница (П)	12,2	-
Вика (В)	-	28,0
П + В (75 : 25)	13,1	29,2
П + В (50 : 50)	13,4	28,5
П + В (25 : 75)	12,8	28,2

В целом в смешанных посевах пшеница формировала зерно с содержанием сырого белка на 0,6–1,1%, а вика – на 0,2–1,2% выше, чем в чистых одновидовых посевах. Наибольшее количество сырого белка в зерне вики содержалось при соотношении П:В = 75:25, в зерне пшеницы – при П:В = 50:50. Наибольшее количество сырого белка в зерне вики зафиксировано при соотношении 75:25, тогда как наименьшее – при обратном соотношении 25:75. Максимальное количество клейковины в зерне пшеницы достигнуто при соотношении 50: 50; качество ее не зависело от доз азота и вида посева.

Повышение влажности почвы снижает концентрацию большинства аминокислот в семенах вики (табл. 4.1.6). При этом не меняется содержание гистидина, треонина, валина и несколько повышается – метионина и фенилаланина. Уменьшается также содержание незаменимых и общего количества аминокислот.

Таблица 4.1.6 – Содержание аминокислот в белках семян вики в зависимости от влагообеспеченности, %абс. сух. в-ва

Аминокислота	Средне многолетняя	Выше средне многолетней
Лизин	1,72	1,65
Валин	1,26	0,91
Метионин	0,10	0,17
Гистидин	0,72	0,79
Аргинин	2,53	2,06
Треонин	0,79	0,76
Изолейцин	1,17	0,81
Лейцин	1,98	1,62
Фенилаланин	1,12	1,26
Аспарагиновая кислота	3,21	2,60
Серин	1,15	0,78
Глютаминовая кислота	5,52	4,80
Пролин	1,03	0,74
Глицин	1,07	0,65
Аланин	1,02	1,09
Тирозин	1,10	0,80
Сумма аминокислот	25,50	21,50
Сумма незаменимых аминокислот	11,40	10,00
Сумма лимитирующих аминокислот (лизин, валин, метионин)	3,10	2,70

**Горох** является высокобелковым продовольственным и кормовым продуктом. К основным показателям качества зерна гороха относят: содержание белка, разваримость зерна, товарность семян. Зерно содержит, % сух. в-ва: белка – 20–36; крахмала – 40–55; жира – 1–2; клетчатки – 5–6; сахара – 8–9; золы – 3–4. Содержание белка в отдельных частях семян гороха неодинаково, % сух. в-ва: в оболочках – 3,2–3,5; ростках – 41,2–45,2; семядолях – 24,3–35,5. В семенных оболочках минимальное количество белка, в ростках – наибольшее. Основную часть белкового комплекса составляют глобулины, наименьшая доля приходится на глютелины, % суммарного бел-

ка: альбумины – 9,6; глобулины – 85,7; глютелины – 4,8. В семенах гороха выделены: водорастворимый легумелин и два глобулина – легумин и вицианин.

По составу незаменимых аминокислот белки зерна гороха близки к белкам молока и мяса, их усвояемость достигает 83–87%. Содержание витаминов в зерне гороха составляет, мг%:  $V_1$ –1;  $V_2$ –0,2; PP–2; E–8. При оценке технологических свойств гороха для производства крупы необходимо обращать внимание на то, что выход крупы из зерна составляет 76–78%, выход целого гороха после лущения – 34–60%, колотого – 17–42%, лузги, мучки, сечки – 20–23%.

В зерне гороха содержится 150–170 г переваримого белка в расчете на одну кормовую единицу. Зерно гороха используют на корм животным и птице. Важным и ценным кормовым продуктом являются зеленая масса, сено и травяная мука. На зеленую массу горох выращивают в чистом виде и в смеси с овсом и ячменем. По качеству силос из горохово-злаковых смесей превосходит кукурузный, поскольку в нем содержится больше белков и каротина. На корм используют также гороховую солому (6–8% белка и до 34% БЭВ).

На типичном черноземе при длительном применении органических и минеральных удобрений (10 лет) содержание белка в зерне гороха менялось незначительно (20,3–21,3%). Наибольшее количество белка накапливалось при внесении 40 т/га навоза под предшественника – сахарную свеклу. В зерносвекловичном севообороте на выщелоченном черноземе применение фосфорных и калийных удобрений в дозах  $P_{60-90}K_{60-90}$  не оказывало существенного воздействия на содержание белка в зерне гороха (Богомазов, 1996)

**Донник** (двухлетнее растение) выращивают для производства зеленого пастбищного корма, сена, сенажа, силоса и сенной муки. Сенокосы донника дают 6–7 т/га сена, но, в отличие от сераделлы, вегетативная масса растения после цветения быстро грубеет и теряет кормовую ценность.

В сене донника содержится 27% сухого вещества, 16% белка, 0,5% жира, 9,7% клетчатки, 10,5% БЭВ и 1,7% золы. Донник белый содержит меньше кумарина, поэтому больше востребован в качестве корма, чем донник желтый. В последнее время площади посева донника желтого расширены в центральных и западных районах страны, Поволжье и Сибири.

**Клевер луговой** (зеленую массу) используют для приготовления сена, силоса, травяной муки, гранул и брикетов. Для этого его убирают в период бутонизации, так как в дальнейшем повышается содержание клетчатки и снижается количество белка в тканях растений.

В 100 кг зеленой массы – 21 кормовая единица, а также 2,7 кг переваримого белка, 4 г каротина, 380 г кальция, 70 г фосфора. Сено клевера считается высококачественным грубым кормом для всех видов сельскохозяйственных животных. Клевер включают в состав многокомпонентных смесей для создания долгодетных культурных пастбищ, которые используются в течение 3–5 лет.

Подавление азотфиксации под действием азотных удобрений приводит к уменьшению количества сырого белка в сене клевера (табл. 4.1.7). Фос-

форные и калийные удобрения ( $P_{60}K_{60}$ ) снижали содержание сырого белка в злаках и клевере 1-го укоса и повышали его во 2-м вследствие усиления фиксации азота клевером. Под действием азотных удобрений (на фоне РК) увеличивалось содержание сырого белка в злаках и уменьшалось его количество в клевере.

Условия питания неоднозначно действовали на углеводный комплекс биомассы клевера. Содержание сахаров в клевере снижалось под действием полного минерального удобрения. Содержание крахмала в сене 1-го укоса повышалось и не менялось во 2-м. Доля клетчатки не менялась в 1-м укосе и увеличивалась во 2-м. Содержание фосфора не зависело от условий питания, а количество жира снижалось.

Таблица 4.1.7 Влияние минеральных удобрений на качество сена многолетних трав (Стрельникова и др., 1991)

Показатель	1-й укос						2-й укос					
	злаки			клевер			злаки			клевер		
	кон- троль	РК	Н*РК	кон- троль	РК	НРК	кон- троль	РК	НРК	кон- троль	РК	НРК
Сырой белок, %	10,1	8,8	11,8	18,3	17,9	17,2	11,0	12,2	13,4	18,5	19,1	18,5
Водорастворимые сахара, %	4,28	4,96	4,29	5,53	5,16	5,79	9,30	6,95	6,36	5,19	4,78	5,58
Крахмал, %	1,52	2,15	2,52	1,61	1,94	1,77	3,85	3,87	3,69	1,93	1,83	1,91
Клетчатка, %	38,5	36,7	35,5	24,1	24,0	24,1	27,2	27,9	28,6	19,4	20,9	22,1
Жир, %	2,57	2,28	2,83	3,56	3,16	3,15	3,67	3,33	3,43	4,15	3,58	2,80
Фосфор, %	0,27	0,24	0,27	0,28	0,26	0,29	0,29	0,31	0,30	0,29	0,27	0,27
К:Са+Mg	3,79	3,12	3,43	1,58	1,18	1,67	2,58	2,27	2,57	1,13	1,16	1,02

\*Азот вносили с первого года пользования

**Козлятник восточный** по количеству белков и аминокислотному составу близок к люцерне. Он отличается высоким содержанием не только белков, но и углеводов и зольных элементов. Козлятник используют на корм животным в свежем виде, для заготовки сена, сенажа, приготовления искусственно высушенных высокобелковых концентратов (брикеты, гранулы, резка, травяная мука). В 100 кг зеленой массы козлятника содержится 20–21 кормовая единица, в 100 кг сена – 57–58. На одном месте растение возделывают 8–9 лет, урожай зеленой массы доходит до 700–800 ц/га (Лошаков, 2015).

**Люпин однолетний.** Люпин используют на зеленый корм и силос, для получения травяной муки, сенажа и растительных компостов. Возделывают как поукосную и пожнивную культуру. Зерно и зерносенаж идут на корм животным, а также из них получают высокобелковую муку, белковые изоляты и белково-витаминные добавки. По количеству в продукции белков, отличающихся хорошей переваримостью и полноценностью аминокислотного состава, люпин превосходит ряд бобовых растений (горох, вика, бобы), а по качеству и усвояемости белков уступает только сое.

Содержание белка в зерне люпина может достигать 61,3%, то есть почти 2/3 массы приходится на долю белков (Плешков, 1987). Зерно люпина характеризуется пониженным содержанием крахмала и повышенным – клетчатки.

Зерно люпина содержит, % сух. в-ва: белков – 32–46; крахмала – 3; жира – 5; клетчатки – 16; сахаров – 2; золы – 4. По содержанию отдельных незаменимых аминокислот белки зерна люпина в 1,5–4 раза превосходят белки семян злаковых культур (табл. 4.1.8).

Белок люпина имеет самую высокую переваримость крупным рогатым скотом (91%), тогда как переваримость белков кормовых бобов – 83%, гороха – 88%, сои – 90% (Новиков и др., 2002). На одну кормовую единицу в зерне люпина узколистного приходится 265 г переваримого белка, люпина желтого – 324 г, что соответственно в 2,3 и 2,8 раза больше зоотехнической нормы для КРС.

Таблица 4.1.8 – Содержание сырого белка и аминокислот в злаковых и бобовых растениях (Новиков и др., 2002)

Культура	Белок, аминокислоты, г/кг корма			
	сырой белок	лизин	метионин+цистин	триптофан
Ячмень	110–120	4,2–4,4	3,2–3,5	1,5–1,6
Овес	105–110	3,5–3,6	3,0–3,2	1,4–1,5
Горох	215–220	14,5–14,8	5,0–5,5	1,8–2,0
Вика	250–260	14,5–14,8	5,0–5,5	1,8–2,0
Кормовые бобы	260–270	16,5–16,7	5,0–5,5	1,8–2,0
Люпин узколистный	300–320	17,5–17,6	6,3–6,5	2,0–2,1

В сухом веществе зеленой массы люпина содержится, %: органического вещества – 93,8; сырого белка – 20–21,2; БЭВ – 3,0; золы – 4,3. Белок люпина вследствие низкого содержания ингибитора трипсина может широко применяться в кормах для животных без предварительной термобработки.

Использование люпина на корм животным ограничивается присутствием в семенах и зеленой массе до 2% алкалоидов. В семенах горьких сортов количество алкалоидов достигает 1,7–1,9%, в малоалкалоидных – 0,2–0,025%, в безалкалоидных – 0,0025% (Вавилов, Посьпанов, 1983).

**Люцерна посевная** – самая ценная кормовая культура с высоким содержанием белков, каротина, жира и минеральных веществ. В 1 кг зеленой массы содержится 0,21 кормовой единицы, 29 г переваримого белка, 50 мг каротина, 3,8 г кальция, 0,8 г фосфора. Из зеленой массы люцерны готовят сено высокого качества, высокобелковую травяную муку, добавляют ее в кукурузный силос. Люцерну применяется в создании долголетних пастбищ.

На дерново-подзолистой почве (подвижный фосфор – 150 мг/кг, подвижный калий – 120 мг/кг) люцерна сорта Вега 87 формировала урожай сухого вещества в пределах 8,9–10,1 т/га независимо от применяемых удобрений (табл. 4.1.9). При этом удобрения не влияли на содержание сырого белка, жира и золы в биомассе. В то же время полное минеральное удобрение снижало содержание клетчатки и повышало количество БЭВ (Лазарев и др., 2007). В сухом веществе пяти сортов люцерны содержалось: 15,0–15,7% сырого белка; 28,1–29,9% клетчатки; 3,0–3,5% жира; 45,4–46,4% БЭВ и 6,2–6,8 золы.

Таблица 4.1.9 – Влияние минеральных удобрений на биохимический состав люцерны, % от сухой массы (Лазарев и др., 2007)

Вариант	Сырой протенин	Сырая клетчатка	Сырой жир	БЭВ	Сырая зола	Урожай, т/га
Контроль	16,01	32,10	2,60	42,59	6,70	9,9
P <sub>30</sub> K <sub>45</sub>	15,66	30,66	2,54	44,39	6,75	10,1
P <sub>60</sub> K <sub>90</sub>	15,91	30,10	2,62	44,42	6,95	8,9
P <sub>30</sub> K <sub>45</sub> N <sub>60</sub>	15,82	28,42	2,77	46,41	6,58	9,6
P <sub>60</sub> K <sub>90</sub> N <sub>60</sub>	16,01	29,03	2,73	45,37	6,86	9,9

**Лядвенец рогатый** (зеленую массу) используют в качестве корма, готовят сено, сенаж, силос. Зеленая масса, сено и силос лядвенца едят сельскохозяйственные животные всех видов. В 100 кг зеленой массы содержится 25,7 кормовой единицы и 4,5 граммов переваримого протенина. По питательной ценности сено лядвенца превосходит клеверное. Его используют для создания высокопродуктивных долголетних сенокосов и пастбищ в течение 10 лет. Корм из лядвенца не приводит к избыточному ожирению животных, не вызывает тимпаний и метеоризма. В молоке коров, которых кормят сеном лядвенца, больше витаминов А и Е по сравнению с молоком тех, в рацион которых входит сено люцерны. В зеленой массе лядвенца в период цветения содержатся алкалоиды, которые ограничивают ее использование в свежем виде. В процессе силосования и сушки алкалоиды разрушаются (Лошаков, 2015).

**Многолетние бобово-злаковые травы.** Ткани бобовых культур различаются по содержанию сырого белка, % на сух.в-во: в доннике белом – 3–18; клевере луговом – 11–24; люцерне посевной – 12–27; эспарцете – 13–20. Азотистые вещества в люцерне распределены неравномерно, содержание сырого белка, % на сух. в-во: в листьях – 33,1; в черешках – 14,1; в стеблях – 11,1. Большую часть белкового комплекса листьев бобовых трав составляют альбумины и глобулины (60–75% суммарного белка), на долю щелочерастворимых белков приходится 20–30 %; спирторастворимые в травах отсутствуют. В белках трав содержатся все незаменимые аминокислоты (табл. 4.1.10).

Таблица 4.1.10 - Содержание аминокислот в растениях

Азот аминокислот, % азота белка	Люцерна	Тимофеевка
Лейцин	9,7	8,9
Изолейцин	5,7	5,0
Лизин	6,9	6,3
Метионин	1,6	2,2
Фенилаланин	6,3	6,2
Триптофан	1,7	1,9
Треонин	5,5	5,0
Валин	6,9	6,3

Злаковые травы содержат больше метионина и триптофана, чем бобовые. Содержание же остальных аминокислот выше в белках люцерны. По содержанию ряда аминокислот (валин, треонин и фенилаланин) белки бо-

бобовых трав не уступают яичному белку, а по количеству триптофана и лейцина превосходят его. До 80% небелкового азота трав составляют свободные аминокислоты и амиды.

Углеводный комплекс трав представлен крахмалом, сахарами, гемицеллюлозой, клетчаткой. Легкоусвояемые углеводы выделены в группу безазотистых экстрактивных веществ. Содержание в травах БЭВ составляет: люцерна, клевер – 23–57; тимофеевка, кострец – 31–60%. Как правило, в злаковых травах оно выше, чем в бобовых.

Содержание сахаров и крахмала в травах зависит от их вида и условий выращивания, %:

в бобовых травах:  
 моносахаридов – 3–5;  
 сахарозы – 2–5;  
 крахмала – 6–8;

в злаковых травах:  
 моносахаридов – 1–3;  
 сахарозы – 2–6;  
 крахмала – нет.

В травах семейства мятликовых вместо крахмала содержатся фруктозаны – низкомолекулярные полисахариды, содержащие 3–40 остатков фруктозы; их концентрация в травах колеблется в пределах 2–6%. Количество БЭВ в бобовых травах возрастает до фазы бутонизации, в мятликовых – до фазы выхода в трубку; затем содержание этих веществ постепенно падает.

Гетерополисахарид гемицеллюлоза, входящий в состав оболочек клеток, играет роль запасного вещества. Содержание ее в травах колеблется в пределах, %:

в злаковых травах – 10–15;  
 в бобовых травах – 4–8.

Клетчатка относится к труднорастворимым углеводам. Ее доля в травах зависит прежде всего от условий выращивания, а также вида, %: в люцерне – 21–46; клевере – 15–40; доннике – 15–30; мятликовых травах – 22–38. Фракция сырой клетчатки включает лигнин. Его содержание в травах может достигать 10–14%. Лигнин ограничивает доступность других веществмикроорганизмам, которым свойственна способность к размножению.

Содержание жира в травах невелико и зависит прежде всего от вида, %: в бобовых травах – 2–5; мятликовых травах – 1,5–3. Распределены жиры неравномерно: их больше в листьях и соцветиях и меньше в стеблях.

В бобовых травах больше органических кислот (5–10% сух.в-ва), чем в мятликовых (2–3% сух. в-ва) (таблица 4.1.11).

Таблица 4.1.11 – Содержание органических кислот в травах, %

Органические кислоты	Бобовые травы	Мятликовые травы
Яблочная	3–6	0,8–1,3
Лимонная	1–2,5	0,3–0,5

Для бобовых трав характерно накопление маленовой кислоты (1,5–2% сух. в-ва).

Из витаминов в травах в наибольшем количестве содержатся каротиноиды и аскорбиновая кислота. В надземной массе трав наибольшее количе-

ство  $\beta$ -каротина, мг%: в бобовых – 20–25, в мятликовых – 10–20. Содержание аскорбиновой кислоты, тиамин и рибофлавин в травах составляет, мг% сухого вещества (табл. 4.1.12).

Таблица 4.1.12 – Содержание в травах витаминов, мг%

Травы	Аскорбиновая кислота	Тиамин	Рибофлавин
Бобовые	400–500	0,2–1,5	2,5–3,3
Мятликовые	200–300	0,5–1,3	2–3

В бобовых травах накапливается витамин  $V_{12}$ , который синтезируется в бактероидах клубеньков; в злаковых его нет.

Проведение инокуляции в условиях дерново-подзолистой почвы повышало урожай сухой массы бобово-злаковых трав на 20% (табл. 4.1.13). Применение инокуляции на бобовых травах обеспечивает прибавку урожая сена на 15% и выше (Проворная, Сильвестрова, 2007; Попов, Федорова, 2012). Наибольший урожай люцерно-злаковая смесь формировала при инокуляции и применении калийных удобрений, тогда как клеверозлаковая – только при инокуляции. Калийные удобрения (120 кг  $K_2O$ /га) повышали урожай сухого вещества люцерно-злаковой смеси на 8%, тогда как урожай клеверозлаковой смеси уменьшился на 10%.

Таблица 4.1.13 – Продуктивность и качество урожая бобово-злаковых травосмесей (Лазарев, Стародубцева, 2017)

Состав травостоя	Урожай сена, т/га	Сырой белок	Сырая клетчатка	Сырой жир	Фосфор	Кальций
		% сухой массы				
<i>Без инокуляции</i>						
Злаки	2,33	10,8	33,0	2,12	0,13	0,80
Злаки + люцерна изменчивая Пастбищная 88	3,31	14,4	35,3	2,74	0,16	0,87
Злаки+ клевер луговой Марс	3,69	14,4	35,3	2,72	0,18	0,83
<i>При инокуляции</i>						
Злаки	2,93	10,2	34,4	1,89	0,13	0,70
Злаки + люцерна изменчивая Пастбищная 88	3,98	14,4	35,7	2,90	0,2	0,91
Злаки+ клевер луговой Марс	4,44	15,1	36,0	2,63	0,16	0,85
<i>При внесении <math>K_{180}</math></i>						
Злаки	2,40	11,0	35,1	2,24	0,14	0,65
Злаки + люцерна изменчивая Пастбищная 88	4,32	13,9	36,2	2,26	0,17	1,01
Злаки+ клевер луговой Марс	4,00	14,1	36,0	2,46	0,21	0,83
<i>При инокуляции и внесении <math>K_{180}</math></i>						
Злаки	2,68	10,7	34,1	2,43	0,16	0,75
Злаки + люцерна изменчивая Пастбищная 88	4,61	14,2	36,0	2,34	0,24	1,23
Злаки+ клевер луговой Марс	4,16	16,0	36,4	1,87	0,21	0,76

Наибольшее количество сырого белка в сене люцерно-злаковой смеси накапливалось при инокуляции и применении калийных удобрений, а в клеверозлаковой смеси – при инокуляции. В условиях засушливого периода ускорялось прохождение фаз вегетации бобовыми травами, снижалась их облиственность, поэтому в этих смесях повышалось содержание клетчатки (Лазарев и др., 2003). При этом травы потребляли меньше фосфора. Бобово-злаковые травы накапливали больше сырого белка и особенного кальция.

Качество корма бобово-злаковых трав возрастает, поскольку в смешанных посевах происходит передача 100–110 кг N/га от бобовых к злаковым (Эседуллаев, Шмелева, 2016). Так, повышение доли клевера до 50% в травосмеси козлятника с тимофеевкой увеличивало содержание сырого белка в сене на 1,7%.

**Нут** используют в пищу в вареном виде, готовят из него суррогат кофе. Семена белого цвета идут в пищу, семена темной окраски – на корм животным. В стеблях и листьях нута содержится значительное количество органических кислот (яблочная, щавелевая), поэтому зеленую массу скармливают овцам.

Семена нута имеют белую, желтую, черную, коричневую, зеленую, розовую и оранжевую окраску; масса 1000 семян колеблется от 200 до 300 г. В семенах содержится 12–32,7% белка, 7% масла, свыше 60% БЭВ.

В листьях и стеблях нута значительное количество органических кислот (щавелевая, яблочная), что не позволяет использовать зеленую массу на корм животным, за исключением овец и свиней.

Бобы нута при созревании не растрескиваются, но при перестое опадают. Средний урожай семян составляет 5–6 ц/га, максимальный – 41 ц/га.

**Сераделла посевная** наибольшую зеленую массу (20–25 т/га) формирует в период цветения. После скашивания она отрастает и дает еще 9–10 т/га отавной зеленой массы. Сераделлу выращивают на зеленый корм, сено и семена. В зеленой массе сераделлы содержится, %: белка – 3,6, жира – 1,15, клетчатки – 6,7, БЭВ – 9,5. Сено сераделлы богато фосфором, кальцием, калием, каротином. В 100 кг зеленой массы – 2,4 кг переваримого белка, 17,1 кормовой единицы; в 100 кг сена – 11–14 кг переваримого белка, 48 кормовых единиц.

По кормовым свойствам сено сераделлы не уступает клеверному. Оно служит зеленой подкормкой животным до поздней осени. Растение широко используется на силос. Сераделла – хороший медонос.

На дерново-подзолистой песчаной почве содержание сырого белка в сене сераделлы повышалось до 20,3% при внесении азотных и калийных удобрений ( $N_{60}K_{90}$ ), что на 1,8% выше, чем в контроле (табл. 4.1.14).

При этом увеличивается количество незаменимых аминокислот. Полное минеральное удобрение повышало содержание жира, клетчатки, каротина и золы в сене, тогда как количество БЭВ при этом снижалось (Шаповалов и др., 2013). Фосфорные удобрения (при высоком содержании подвижного  $P_2O_5$  в почве) способствовали большему накоплению БЭВ и уменьшали количество сырого белка и золы. Калийные удобрения (при низком содержании подвижного  $K_2O$  в почве) увеличивали содержание сырого белка, жира, каротина и золы в сене и снижали количество БЭВ. Соотношение  $K:Ca+Mg$  в сене сераделлы находилось в пределах нормы (1,3–2,5).

Таблица – 4.1.14 – Влияние минеральных удобрений на качество урожая сераделлы, % на абс. сух.в-во (Шаповалов и др., 2013)

Показатели	Вариант				
	контроль	P <sub>90</sub>	P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	N <sub>60</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	N <sub>60</sub> K <sub>90</sub>
Сырой белок	18,50	18,27	19,23	19,46	20,31
Азот общий	2,89	2,88	3,06	3,20	3,23
Азот белковый	2,10	2,15	2,23	2,28	2,35
Азот небелковый	0,79	0,73	0,83	0,92	0,88
Жир	1,99	2,00	2,38	2,29	3,07
Клетчатка	33,40	32,30	33,4	35,30	35,70
БЭВ	40,10	42,0	38,0	32,80	32,50
Зола	6,88	6,60	7,26	9,45	8,55
К	1,68	1,85	2,15	2,56	2,43
Р	0,33	0,35	0,35	0,32	0,33
Са	0,85	0,82	0,88	0,85	0,73
Mg	0,32	0,34	0,29	0,35	0,32
Каротин, мг/кг	13,50	15,20	19,90	23,90	23,70

**Сою** возделывают как пищевое, кормовое и техническое растение. Используют как диетический продукт питания для больных диабетом. Ее белок отличается хорошей растворимостью в воде и высокой усвояемостью; по содержанию незаменимых аминокислот он богаче, чем белки других зерновых бобовых культур.

В состав зерна сои входит, %: белков – 27–50, крахмала – 3–5, жира – 18–27, клетчатки – 4–5, сахаров – 9–11, золы – 5–6. Семена сои отличаются повышенным содержанием белков, жиров, сахаров и пониженным – крахмала. По биологической ценности белки сои приравнивают к белкам коровьего молока. Наибольшую долю в белковом комплексе занимает глобулин глицинин. Содержание белка в зерне сои обратно пропорционально количеству жира, поскольку эти вещества сосредоточены в основном в зародыше семени.

В зародышах семени большее количество альбуминов и глютелинов, тогда как в семядолях – глобулинов (табл. 4.1.15). Для целого семени характерны низкие концентрации альбуминов и глютелинов.

Таблица 4.1.15– Фракционный состав частей семени сои (Мякушко, Баранова, 1984)

Часть семени	Фракции, % от белкового азота		
	альбумины	глобулины	глютелины
Целое семя	9,5	78,8	11,7
Зародыш	17,3	65,7	16,0
Семядоли	10,2	76,7	13,1

Состав аминокислот белков семян сои (г/100 г белка): лизин – 5,7–6,3, гистидин – 2,5–2,9, аргинин 6,4–7,3, треонин – 3,9–4,2, валин – 3,4–3,7, лейцин – 6,1–7,0, изолейцин – 2,8–3,1, фенилаланин – 4,1–4,6. Лимитирующей аминокислотой в белке семян сои является метионин. Дефицит метионина вызван его включением в один из запасных белков (β-конглицинин).

Ценными веществами зерна сои являются лецитин (35% от всех фосфатидов), пефалин, инозитолфосфатиды. Эти вещества играют важную роль в процессах обмена жиров и углеводов в организме теплокровных, участвуют в синтезе белков, способствуют их усвоению, усиливают сопротивляемость организма болезням (Заверюхин, Левандовский, 1988).

Содержание углеводов в зерне сои – 22–35%, в том числе: сахарозы – 3,3–13,5; моносахаров – 0,1–2,2; рафинозы – 1,1; стахиозы – 3,5; крахмала и декстрина – 3,1–9,0%. Витаминный состав зерна сои, мг/кг: каротина – 1,2;  $V_1$  – 11–17,5;  $V_2$  – 2,1–2,7; С – 100–200; Е – 400–600; есть также витамины К и РР. В листьях сои 6–10% лимонной кислоты.

Зола зерна сои включает в себя следующие элементы, %: калий – 1,7–2,5; кальций – 0,23–0,96; фосфор – 0,44–1,09; магний – 0,45–0,55; натрий – 0,62; сера – 0,48 и железо – 95–240 мг/кг. Однако усвояемость большинства минеральных веществ в семенах сои незначительная. Так, слабая усвояемость фосфора связана с тем, что 2/3 его количества входит в состав фитина.

Для получения высококачественного зерна лучшими предшественниками сои считаются озимые и яровые зерновые культуры, а также кукуруза на зеленый корм и силос. Сою также сеют после овощных и кормовых культур. Нельзя производить посевы сои после других бобовых культур, вблизи насаждений акации и мест произрастания многолетних бобовых трав. Непригодными предшественниками для сои являются суданская трава и подсолнечник.

Содержание белка в зерне сои повышается под действием инокуляции семян клубеньковыми бактериями перед посевом: без инокуляции – 42%, при инокуляции – 49%. Внесение азотных и фосфорных удобрений (в дозе по 60 кг/га) в условиях темно-каштановых почв повышало не только продуктивность сои (на 6 ц/га), но и содержание белка в зерне на 2,1% (Заверюхин, Левандовский, 1988). Внесение калийных удобрений в той же дозе (на фоне  $N_{60}P_{60}$ ) не оказывало существенного действия на количество белка в зерне из-за высокого содержания подвижного калия в почве.

На выщелоченном черноземе в засушливый год резко (в 1,5–1,8 раза) падала продуктивность сои (табл. 4.1.16). При этом снижалось содержание сырого белка в зерне – на 1,1–4,3%.

Таблица 4.1.16 – Продуктивность и качество зерна сои в зависимости от погоды и минеральных удобрений (Шеуджен и др., 2013)

Вариант	Урожай зерна, ц/га		Сырой белок, %		Содержание масла, %	
	оптимальный год	засушливый год	оптимальный год	засушливый год	оптимальный год	засушливый год
Без удобрений	15,1	10,8	34,7	33,7	20,8	21,9
$N_{20}P_{40}K_{20}$	19,4	12,5	38,4	34,2	21,0	21,6
$N_{40}P_{80}K_{40}$	22,8	14,1	39,4	37,5	21,2	21,3
$N_{60}P_{120}K_{60}$	23,3	13,2	41,1	36,8	21,4	21,4

Наибольшее количество сырого белка в зерне соя накапливала при внесении  $N_{60}P_{120}K_{60}$  в благоприятный год (41,1%) и при внесении  $N_{40}P_{80}K_{40}$  в засушливый (37,5%) (Шеуджен и др., 2013). Погодные условия и минеральные удобрения не оказывали существенного влияния на содержание масла в зерне: 20,8–21,4% в благоприятный год и 21,3–21,9% – в засушливый.

Из сои производят масло, маргарин, соевый сыр, молоко, муку, кондитерские изделия, консервы, полуфабрикаты. Соя служит сырьем для маслобоен. Масло используют не только в пищу, но и в мыловарении и лакокра-сочной промышленности. Соя также – это зеленый корм, силос (с кукурузой). Важное кормовое значение имеют соевая мука, шрот и жмых. Шрот содержит 40% белка, 1,4% жира и 30% БЭВ.

У **фасоли** соотношение основных частей семени составляет, %: семенная оболочка (кожура) – 6,4–11; семядоли – 87,2–92,5; корень, стебель, почечка – 1,1–2,8. Зерно фасоли содержит, % сух. в-ва: белков – 17–32; крахмала – 55; жира – 1–3; клетчатки – 3–5; сахаров – 4–6; золы – 3–5. Количество белков в отдельных частях семени неодинаково, % сух. в-ва: в оболочках – 10,4–11,5; в ростках – 34,9–35,6; в семядолях – 23,6–30,3. Для семян фасоли, в отличие от семян других бобовых культур, характерно повышенное содержание белков в семенных оболочках. В белковом комплексе семян фасоли преобладает глобулин фазеолин. В белке фасоли есть все необходимые человеку аминокислоты. Вследствие высокой биологической ценности белок фасоли применяют в качестве специфических добавок в хлебопекарной, макаронной и кондитерской промышленности. Из фасоли производят ряд медицинских препаратов.

В бобах зеленой фасоли содержится большое количество жира, сахаров и витаминов. В недозрелых – 48–56 мг/100 г витамина С. Овощную фасоль широко используют для приготовления супов, винегретов, салатов, а также она служит сырьем для консервной промышленности.

Благодаря диетическим свойствам фасоль включают в лечебное питание при заболеваниях печени, а также острых инфекциях и поражениях центральной нервной системы. Пюре фасоли рекомендуется при гастритах и пониженной секреции желудочных желез и ожирении печени. Настой и отвар семян фасоли применяют при сердечной слабости и отеках, гипертонии, заболевании почек и печени, подагре и ревматизме.

Одним из условий получения высококачественного урожая зерна фасоли является ее возделывание на чистых от сорняков полях. Лучшие предшественники для фасоли – озимые, кукуруза, сахарная свекла, бахчевые. В северных районах ее выращивания как хороший предшественник зарекомендовал себя картофель.

После яровых зерновых (из-за большой засоренности) фасоль сеять нецелесообразно. В районах, где распространена склеротиния, ее не следует сеять после подсолнечника. Нецелесообразно также повторные посевы фасоли из-за поражения вирусными заболеваниями. Сеять фасоль на старом месте лучше не ранее чем через 4–6 лет. В южных районах фасоль возделывают в пожнивных посевах после уборки озимых зерновых культур.

В условиях Нечерноземной зоны для получения высококачественного урожая под фасоль, в отличие от других зернобобовых культур, необходимо вносить более высокие дозы азотных удобрений (в пределах 45–90 кг N/га), тогда как на черноземных почвах их применение не оправдывает себя. На тяжелых малоплодородных землях Нечерноземной зоны рекомендуются органические удобрения при возделывании фасоли. Она хорошо использует последствие таких подкормок, внесенных под предшествую-

щую культуру. Фасоль положительно реагирует на применение фосфорных и калийных удобрений: при дозе  $P_{60}K_{60}$  она формировала урожай зерна на 4,4 ц/га выше по сравнению с контролем (Фирсова, 1961). Наибольшее количество белка в зерне накапливалось при внесении азота в составе полного минерального удобрения ( $N_{30}P_{60}K_{60}$ ): на 1,1% выше, чем в варианте без удобрений, и на 1,9% больше по отношению к фону ( $P_{60}K_{60}$ ).

Фасоль отзывается на нейтрализацию даже слабокислой реакции почвенного раствора. Так, в условиях серых лесных почв внесение доломитовой муки обеспечивало не только повышение на 12–15% продуктивности фасоли, но и увеличение содержания белка в зерне на 1,9% (Орлов и др., 1986).

**Чечевицу** выращивают для пищевого, кормового и технического использования. Зерно используют для производства белковых препаратов, колбас, консервов, некоторых сортов конфет, печенья. Зерно благодаря высоким вкусовым качествам употребляют в пищу в свежем и консервированном виде. По содержанию белка в зерне (30%) и его развариваемости чечевица превосходит горох, нут и фасоль. На корм животным используют солому и полосу. Солома содержит до 14% белка и по питательной ценности приближается к луговому селу. В полосу чечевицы больше белка (до 18%), чем в зерне овса и ржаных отрубях.

При засорении посевов чечевицы вики необходима ручная прополка, поскольку вика сильно снижает пищевые и вкусовые свойства зерна чечевицы (Посыпанов и др., 2007). Прополку проводят через 3–4 недели после посева и в период цветения вики, когда ее легко отличить от чечевицы по красно-фиолетовым цветкам.

**Чину** возделывают как продовольственную, кормовую и техническую культуру. На кормовые цели идут зеленая масса, сено и зерно. Чину луговую используют для создания долголетних лугов, которые сохраняют высокую продуктивность в течение 8–10 лет и служат для выпаса свиней и крупного рогатого скота. Ценность чины как корма определяется количеством усвояемого белка и сочетанием крахмала, сахаров и других веществ. Благодаря высокому содержанию белков, сахаров и воды, меньшему – клетчатки кормовая ценность зеленой массы чины сохраняется более длительный период, чем у других видов бобовых культур (табл.4.1.17).

Таблица 4.1.17– Содержание азота в растениях гороха, чины, нута и чечевицы в разные фазы вегетации (Шевцова и др., 2017)

Культура	Фаза вегетации				
	бутонизация	цветение	налив семян	созревание	
				зерно	солома
Чина	3,59	3,35	3,01	4,18	1,67
Нут	2,82	2,12	1,85	3,25	0,70
Горох	3,27	2,82	2,18	3,64	4,02
Чечевица	2,94	2,71	2,28	3,77	1,33

В период от цветения до плодообразования формирование зеленой массы у чины возрастает в два раза при незначительном снижении содержания белков (Донской, 2016; Донская и др., 2016; Шевцова и др., 2017).

Доля белка в семенах чины колеблется в пределах 26–32%, в зеленой массе – 19–21%. Чина содержит такое же количество лизина, что и в фасоли (3,88%); содержание аргинина (7,05%) превышает таковое в фасоли в два раза; по содержанию триптофана (1,60%) чина уступает чечевице и фасоли.

В зеленой массе присутствуют изофлавоновый гликозид (оробозид), каротин. В соломе и мякине чины больше в 2,5 раза переваримого белка и в 1,5 раза жира и в 1,5–2 раза меньше клетчатки, чем в соломе и мякине овса (Донской, 2016).

Ценным пищевым продуктом считается добавление при производстве хлеба и макаронных изделий муки чины (20%), что повышает их усвояемость.

При поздних сроках сева содержание белков и золы в зерне, зеленой массе и соломе чины повышается, а клетчатки – снижается. В загущенных посевах доли белка и клетчатки в зерне уменьшаются. В широкорядных посевах количество белков растет, а клетчатки – снижается (Шевцова и др., 2017). В смешанных посевах чины (с ячменем, кукурузой, подсолнечником) растет выход кормов с высоким содержанием белков. Чину с успехом используют для создания медоносного конвейера. Объем собранного меда увеличивается при подсеве горчицы белой к посевам чины за счет более длительного периода цветения (Белкова и др., 2016).

**Эспарцет** по кормовой ценности превосходит люцерну и клевер В 100 кг зеленой массы растения содержится 18 кормовых единиц, 2,8 кг переваримого белка, 6,5 г каротина, 240 г кальция и 60 г фосфора. Зеленую массу и сено используют в кормлении всех видов животных. Продолжительность жизни эспарцета на одном месте – 3–4 года, максимальной продуктивности достигает на второй год жизни. Является хорошим медоносом.

Зеленая масса эспарцета отличается высокой питательной ценностью (Волошин, 2015) (табл. 4.1.18).

Таблица – 4.1.18 – Биохимический состав зеленой массы эспарцета, %абс. сух.в-ва (Волошин, 2015)

Показатель	Укосы	
	1-й	2-й
Сухое вещество	22,0–25,0	20,6–25,4
Сырой белок	15,0–17,7	16,2–21,4
Сырой жир	2,5–3,2	2,4–2,6
Сырая клетчатка	27,1–32,0	21,2–26,5
Сырая зола	6,1–8,4	3,0–9,6
Сахар	3,1–6,4	3,5–5,6
Каротин, мг/кг	92,2–100,9	150,3–165,4
Обменная энергия, МДж/кг	9,9–10,1	10,2–11,2
Кормовые единицы	0,69–0,83	0,85–1,01

Во 2-м укосе в зеленой массе эспарцета содержалось больше сырого белка, каротина и обменной энергии, но меньше жира, клетчатки, золы и сахаров.

## 4.2 Накопление загрязняющих веществ в урожае бобовых растений

В условиях мощного антропогенного воздействия на окружающую среду создаются условия повсеместного загрязнения основных компонентов агроэкосистемы (почва, вода, воздух, растения). Локальное, региональное и глобальное загрязнение ведет к нарушению биогеохимических циклов элементов в экосистемах, что ставит под угрозу получение экологически безопасной продукции растениеводства и животноводства.

Накопление в продукции загрязняющих веществ (ЗВ) природного или антропогенного происхождения оказывает негативное воздействие на здоровье человека. Изменение среды обитания, связанное с ее загрязнением, влечет за собой рост заболеваемости. Свыше 90% патологий человека прямо или косвенно связаны с состоянием окружающей среды, которая либо является причиной возникновения заболевания, либо способствует его развитию.

Содержание ЗВ в агроэкосистеме зависит от величины (дозы) поступления и от скорости деградации (скорости полураспада в почве и скорости выведения из живых организмов). В агроэкосистеме постоянно функционируют два противоположно направленных процесса: поступление ЗВ и его деградация, представляющая сложнейший комплекс процессов трансформации.

Экологическое нормирование является научной основой определения допустимой техногенной нагрузки (включая загрязнение) на агроэкосистемы, их устойчивого развития, получения экологически безопасной продукции и минимизации негативного воздействия на окружающую человека среду.

Загрязнение продукции бобовых растений различными вредными веществами обусловлено множеством взаимосвязанных, идущих с различной скоростью процессов в сопряженных средах и компонентах агроэкосистем. Основные пути следующие: загрязнение поллютантами в результате трансграничного переноса ЗВ и выпадение их с атмосферными осадками; загрязнение бобовых культур пестицидами, используемыми для борьбы с вредителями и болезнями растений; нарушение технологических правил применения удобрений, оросительных вод, твердых и жидких отходов промышленности и животноводства, коммунальных и других сточных вод, осадков сточных сооружений; поступление токсических веществ, в том числе радионуклидов, из окружающей среды; разработка новых, нетрадиционных технологий производства продовольствия.

В условиях техногенного пути развития общества экологическая ситуация по многим параметрам достигла критического уровня. Производство сырья и продукции тесным образом связано с вовлечением в круговорот все большего количества вещества и энергии. Поэтому 70% современных экосистем в той или иной степени загрязнены.

Из вышеизложенного можно заключить следующее: во-первых, качество продукции является суммарным и интегральным отражением локального, регионального и глобального состояния окружающей среды и результатом

антропогенного воздействия на агроэкосистемы в сложной комбинации с природными факторами (Черников, Соколов, 2009, 2014); во-вторых, в современных условиях производства получить абсолютно экологически чистую продукцию невозможно.

В семенах и зеленой массе бобовых растений содержатся токсины природного происхождения, которые снижают пищевую и кормовую ценность их продукции. К ним относятся: ингибиторы протеаз, лектины, авитамины, алкалоиды, гликозиды, зобогенные вещества.

Субстратом протеаз являются белки и пептиды, под действием которых образуются пептиды меньшей молекулярной массы или свободные аминокислоты. Известен целый ряд ингибиторов желудочного сока (пепсин, трипсин, химотрипсин). Эти ферменты есть в семенах бобовых растений (соя, фасоль). Из семян сои выделены ингибиторы протеаз – ингибиторы Кунитца и ингибиторы Баумана – Бирка, содержание которых составляет 1,4 и 0,6% сухой массы соответственно. В семенах сои содержится токсичный белок соин, называемый также соевым гемагглютинином или ингибитором роста. Соин вызывает агглютинацию (слипание) эритроцитов крови.

**Лектины** – растительные белки, способные специфически связываться углеводными компонентами реципиентов. Этими свойствами обладают фитогемагглютинины семян бобовых растений (горох, фасоль, чечевица). Лектины могут стимулировать деление клеток и агглютинировать раковые клетки. Эти свойства лектинов основаны на их способности связывать специфические группы сахаров, локализованных на поверхности клеток.

Особенностью люпина является содержание в зеленой массе и семенах физиологически активных токсических веществ – алкалоидов. Содержание их колеблется в широких пределах (табл. 4.2.1).

Таблица 4.2.1 – Уровни содержания алкалоидов в семенах люпина (Новиков и др., 2002)

Группа	Количество алкалоидов, %на сух. в-во	Назначение
1	Очень низкое → 0,025	Пищевые сладкие
2	Низкое – 0,025–0,099	Кормовые малоалкалоидные
3	Среднее – 0,1–0,299	Кормовые среднеалкалоидные
4	Высокое – 0,3–1,0	Сидеральные горькие
5	Очень высокое – 1,001–3,5	Дикорастущие

Признак безалкалоидности люпина является рецессивным, поэтому при опылении безалкалоидных растений алкалоидными уже в первом поколении они будут алкалоидными (Новиков и др., 2002). В связи с этим, чтобы избежать смешивания неизвестных сортов, необходимо соблюдать пространственную изоляцию.

Содержание алкалоидов в зерне и зеленой массе люпина зависит от погодных условий и генотипа (табл. 4.2.2). В засушливые годы в урожае обоих сортов люпина оно повышается в 1,3–1,7 раза.

В засушливый год у сорта Брянский Л-3 в зерне и в зеленой массе зафиксировано в 1,2 раза меньше алкалоидов по сравнению с сортом Брянский 123. В оптимальный год содержание алкалоидов в зеленой массе сорта Брянский Л-3 снижалось в 3 раза по отношению к сорту Брянский 123.

Таблица 4.2.2 – Содержание алкалоидов в урожае сортов люпина в зависимости от погодных условий, % на сух.в-во (Новиков и др., 2002)

Год	Брянский 123		Брянский Л-3	
	зерно	зеленая масса	зерно	зеленая масса
Оптимальный год	0,041–0,059	0,027–0,046	0,029–0,069	0,024–0,025
Засушливый год	0,093–0,104	0,057–0,076	0,070–0,092	0,050–0,064

У новых сортов люпина содержание алкалоидов в зерне колеблется в пределах 0,03–0,05%, что гораздо ниже ПДК (0,3%). Концентрации в зеленой массе новых сортов люпина составляют 0,01–0,04%, что позволяет использовать их для производства зеленых, сочных и концентрированных кормов для всех видов животных. Для скармливания КРС содержание алкалоидов в зеленой массе люпина не должно превышать 0,13–0,14% в расчете на сухое вещество. Наибольшей чувствительностью в этом отношении обладают свиньи: количество алкалоидов в корме должно быть не более 0,06–0,1%.

При вымачивании зерна люпина в трех-четырёх объемах воды в течение 6–8 ч или варке в течение 1 ч содержание алкалоидов снижается на 30–40%. При повышенной влажности воздуха зерно люпина поражается плесневыми грибами, что вызывает накопление большого количества микотоксинов. Такой корм вызывает отравление сельскохозяйственных животных. Запрещено использовать в кормовых целях зерноотходы после обработки посевов люпина дефолиантами и десикантами.

К группе **антивитаминов** относятся вещества, инактивирующие или разрушающие витамины. Антивитамины являются химическими аналогами витаминов, поэтому легко занимают их место в структуре фермента, который теряет свойственную ему активность. В настоящее время выделены следующие вещества, обладающие антивитаминой активностью: антивитамины биотина и пантотеновой кислоты из семян гороха; липоксидаза окисляет каротин в семенах сои; дикумарол в семенах донника приводит к снижению уровня протромбина в организме животных за счет противодействия витамину К.

Значительное количество фосфора в семенах бобовых растений находится в форме **фитина**. Его содержание колеблется в широких пределах, % на сух. в-во: в горохе – 1,6; в сое – 2,2; в фасоли – 2,5; в чечевице – 2,6. Фитин образует труднорастворимые комплексы с ионами цинка, железа и меди.

**Гликозиды** – это производные моносахаридов, соединенные с агликоном (спирты, ароматические и гидроароматические соединения). Наибольшую опасность для человека и животных представляют цианогенные гликозиды. Обусловлено это образованием при их гидролизе синильной кислоты. Наиболее часто эти гликозиды встречаются в растениях семейств розоцветных и бобовых. В семенах вики и фасоли обнаружен гликозид вицианин (0,3–0,7% на сух. в-во).

В продукции бобовых растений выделены азотсодержащие вещества – **нитраты** и **нитриты**. В условиях нитрогенизации биосферы резко возрастает скорость трансформации азотистых соединений в цепочке: нитраты – нитриты – нитрозоамины.

Чрезмерная аккумуляция азотистых соединений в компонентах биосферы затрагивает все важнейшие функции человеческого организма и зачастую вызывает целый ряд негативных последствий. Это предопределяет разработку комплекса мер по снижению «азотного пресса» на человека. В связи с этим возникает реальная необходимость разработки в рамках общей задачи охраны окружающей среды стратегии регуляции уровня нитратов во всех природных объектах и на всех этапах их круговорота: почва – вода – атмосфера – растение – продукция.

Образование, транспорт и аккумуляция  $\text{NO}_3^-$  в компонентах биосферы вместе являются одним из этапов природного цикла азота, тесно связанного с совокупностью процессов, вовлекающих в круговорот и другие азотсодержащие соединения. Принципиальным механизмом образования и накопления нитратов в наземных экосистемах служит процесс нитрификации, который рассматривается как конечный этап круговорота азота. Интенсивность нитрификации отражает в определенной мере уровень плодородия почвы и может быть лимитирующим фактором продуктивности агрофитоценоза. При благоприятных для нитрификации почвенно-экологических условиях возрастает вероятность потерь азота из почвы в результате вымывания и денитрификации, что ограничивает потенциальную продуктивность растений и приводит к накоплению  $\text{NO}_3^-$  в урожае растений в количествах, опасных для здоровья человека и животных. В свою очередь, скорость образования нитратов и уровень их содержания косвенно зависят от процессов фиксации молекулярного азота и аммонификации органических соединений, потребления нитратного азота высшими растениями или микроорганизмами и денитрификации.

Содержание нитратов существенно обусловлено видом возделываемой культуры (табл. 4.2.3). В целом бобовые растения не накапливают в урожае значительных количеств  $\text{NO}_3^-$ . Минимальное количество N- $\text{NO}_3^-$  содержится в зерне гороха и сои; в люпине (ни в зерне, ни в соломе) нитратов нет. По меньшей мере две важнейшие особенности служат основными причинами незначительного накопления  $\text{NO}_3^-$  бобовыми растениями:

- преимущественное питание молекулярным азотом;
- наличие мощного нитратредуктазного комплекса в органах растений.

Таблица 4.2.3 – Содержание азота нитратов в бобовых растениях (Соколов и др., 1990)

Вид	Латинское название	N- $\text{NO}_3^-$ , мг/кг сырой массы
Бобы	<i>Vicia faba</i>	30–100
Горох	<i>Pisum sativum</i>	5–20
Донник, з/м*	<i>Melilotus officinalis</i>	110–240
Клевер луговой, з/м	<i>Trifolium pratense</i>	90–360
Козлятник, з/м	<i>Galega orientalis</i>	140–315
Люцерна, з/м	<i>Medicago sativa</i>	100–400
Соя	<i>Glycine hispida</i>	5–25
Фасоль	<i>Phaseolus vulgaris</i>	5–200
Эспарцет, з/м	<i>Onobrychis arenaria</i>	120–300

\*з/м – зеленая масса

Источники **нитритов** – те же, что и для нитратов, поскольку последние являются их предшественниками. Особенностью в том, что нитриты в живых растительных организмах содержатся в минимальном количестве: в горохе 0,20–0,28; в фасоли 0,55–0,61 мг/кг сырого вещества.

Существенное влияние на накопление нитратов в продукции оказывают условия питания растений, создаваемые минеральными и органическими удобрениями. При внесении полного минерального удобрения и бесподстилочного навоза (не более 90 кг N/га) содержание  $\text{NO}_3^-$  в травосмеси (клевер 33% – тимофеевка 27% – овсяница 40%) на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве колебалось в пределах 62–452 мг/кг (Мерзлая, 2004).

Согласно уравнению регрессии

$$Y_{\text{NO}_3^-} = 82 - 194N^{0.5} + 53N + 196P^{0.5} - 135P + 52(NP)^{0.5}, R = 0,82.$$

На содержание нитратов в травосмеси положительно влияли азотные удобрения и их сочетание с фосфорными. Последние в больших дозах снижали количество  $\text{NO}_3^-$  в травах. Калийные удобрения и бесподстилочный навоз достоверно не влияли на содержание нитратов в бобово-злаковых травах.

Накопление азотистых веществ в травах обусловлен составом травостоя и технологией выращивания (Черников, Соколов, 2009). Качество урожая трав существенно зависит от удобрений, в первую очередь азотных, влияющих на уровень содержания белков и нитратов. При внесении возрастающих доз (30–120 кг/га) азотных удобрений количество сырого белка в травах увеличивалось более чем в два раза, при этом содержание усвояемых углеводов и клетчатки снижалось (Плешков, 1987).

В условиях дерново-подзолистых почв при весенней подкормке бобово-злаковых трав (клевер, тимофеевка) первого года пользования азотными удобрениями в дозе 60 кг/га в сене накапливалось одинаковое количество сырого белка как на склоне, так и на приводораздельной части при обоих способах обработки почвы (отвальная вспашка и плоскорезная обработка) (Явтушенко и др. 2005). При осеннем внесении азотных удобрений в той же дозе содержание сырого белка в сене снижалось на 3–5% по сравнению с весенней подкормкой. Азотные удобрения в дозе 60 кг/га, внесенные весной, повышали в 1,6–1,7 раза содержание сырого белка в сене многолетних трав по сравнению с фоном как на склоне, так и на приводораздельной части склона (Явтушенко и др., 2006).

Содержание сырого белка в многолетних травах (клевер, тимофеевка) снижалось от приводораздельной части склона к тальвегу. Внесение азотных удобрений уменьшало количество сырого белка в травах за счет «ростового разбавления» по сравнению с фоном (РК). Подобная закономерность была установлена несколько ранее (Соколов и др., 2015).

Так, при внесении азотных удобрений в дозе 30–60 кг/га под бобовые культуры (клевер, люпин, кормовые бобы) содержание сырого белка в их биомассе снижалось по сравнению с фоном (Трепачев, 1999). Азотные удобрения, внесенные локально, повышали содержание сырого белка в травах: на водоразделе и в средней части склона – на 1,3%, в нижней части склона – на 3,3% по сравнению с их разбросным применением в той же дозе.

Условия азотного питания оказывают существенное влияние на накопление  $\text{NO}_3^-$  в многолетних травах. Так, подкормка их различными формами азотных удобрений (30–60 кг/га) в условиях дерново-подзолистых почв оказывала неодинаковое действие на накопление нитратов в урожае (Уваров, 1997). Максимальное количество  $\text{NO}_3^-$  (210–213 мг/кг) зафиксировано в сене при подкормке травостоя аммиачной селитрой в дозе 60 кг/га, минимальное (128–129 мг/кг) – при подкормке мочевиной в той же дозе.

Количество нитратов в травах повышалось от водораздела к нижней части склона (табл. 4.2.4). Под действием азотных удобрений, внесенных разбросным способом, содержание  $\text{NO}_3^-$  в биомассе трав увеличивалось на 23–35%. При локальном внесении азотных удобрений количество нитратов в травах снижалось на 10–12% по сравнению с разбросным способом их применения в той же дозе.

Таблица 4.2.4 – Качество урожая сена многолетних трав на разных элементах склона в зависимости от способа применения азотных удобрений

Вариант	Содержание	
	сырой белок, %	$\text{NO}_3^-$ , мг/кг
<i>Приводораздельная часть склона, 2–3°</i>		
$\text{P}_{30}\text{K}_{30}$ -фон	13,5	113
Фон+ $^{15}\text{N}_{30}$ , разброс	10,8	139
Фон+ $^{15}\text{N}_{30}$ , локально	12,1	125
<i>Средняя часть склона, 4–5°</i>		
$\text{P}_{30}\text{K}_{30}$ -фон	12,3	115
Фон+ $^{15}\text{N}_{30}$ , разброс	10,5	147
Фон+ $^{15}\text{N}_{30}$ , локально	11,8	130
<i>Нижняя часть склона, 5–7°</i>		
$\text{P}_{30}\text{K}_{30}$ -фон	12,4	119
Фон+ $^{15}\text{N}_{30}$ , разброс	9,6	161
Фон+ $^{15}\text{N}_{30}$ , локально	12,9	147

Накопление нитратов в сене бобово-злаковых трав определяется злаковым компонентом (тимopheевкой) (табл. 4.2.5). Содержание  $\text{NO}_3^-$  в клевере в зависимости от способа внесения азотного удобрения менялось незначительно, тогда как в тимopheевке в ответ на действие азотных удобрений количество нитратов возрастало на 9–26% по отношению к фону. При этом содержание  $\text{NO}_3^-$  в сене тимopheевки при локальном внесении азотных удобрений снижалось на 14% по сравнению с разбросным способом их применения.

Таблица 4.2.5 – Содержание нитратов в зеленой массе многолетних бобово-злаковых трав, мг/кг сухой массы

Вариант	Клевер+тимopheевка	Клевер	Тимopheевка
$\text{P}_{30}\text{K}_{30}$ -фон	113	57	151
Фон+N <sub>30</sub> , разброс	139	65	191
Фон+N <sub>30</sub> , локально	125	60	165

В смешанных посевах на дерново-подзолистой почве тимopheевка содержала нитратов в 1,5–3,8 раза больше, чем клевер в 1-м укосе, и в 1,5–2,3 раза – во 2-м (табл. 4.2.6).

Таблица 4.2.6 – Влияние минеральных удобрений на содержание нитратов в многолетних бобовых и злаковых травах, мг/кг (Стрельникова и др., 1991)

Состав агрофитоценоза	1-й укос			2-й укос		
	без удобрений	P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	без удобрений	P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>
Клевер луговой	445	525	557	475	538	580
Тимopheевка луговая	678	728	2145	795	952	1360

Во 2-м укосе клевер накопил большее количество NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (на 2–7%). Фосфорные и калийные удобрения (внесенные совместно) повышали содержание NO<sub>3</sub><sup>-</sup> в клевере на 13–18% и на 7% в биомассе тимopheевки. Проведение подкормок азотными удобрениями со второго года жизни существенно (на 22–25%) повышало содержание нитратов в клевере и незначительно – в тимopheевке (в 1,7–3,2 раза). Наличие бобового компонента снижало количество NO<sub>3</sub><sup>-</sup> в тимopheевке по сравнению с чисто злаковым травостоем (Стрельникова и др., 1991).

В условиях чернозема выщелоченного (при орошении) наибольшее количество нитратов зафиксировано в фитомассе гороха, наименьшее – в фитомассе эспарцета (табл. 4.2.7). Разные виды бобовых неодинаково реагировали на азотные удобрения. Так, при внесении 60 кг N/га в фитомассе гороха содержание NO<sub>3</sub><sup>-</sup> повышалось на 85,5%, тогда как при внесении 30 кг N/га в фитомассе эспарцета – на 28,6% (Андрианова, Барсуков, 1998). Концентрация нитратов в фитомассе вики и люцерны увеличилась на 68 и 53% соответственно.

Под действием азотных удобрений возрастает активность нитратредуктазы в листьях бобовых растений. При внесении 30 кг N/га под вику и эспарцет и 60 кг N/га под люцерну активность НРА возросла у вики и эспарцета в 1,6–1,7 раза, у люцерны – в 2,6 раза.

Таблица 4.2.7 – Влияние азотных удобрений на содержание нитратов в надземной массе бобовых кормовых культур (Андрианова, Барсуков, 1998)

Культура	Вариант	Содержание NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
		мг/кг сырой массы	прибавка к контролю, %
Вика	контроль	85,5	-
	N <sub>60-80</sub>	143,9	68,3
Горох	контроль	129,0	-
	N <sub>60</sub>	239,3	85,5
Люцерна	контроль	115,6	-
	N <sub>30-80</sub>	176,7	52,8
Эспарцет	контроль	49,0	-
	N <sub>30</sub>	63,0	28,6

Нитраты в растениях накапливаются в основном за счет азота почвы (60–90% от общего количества) (Соколов и др., 1990). Размеры его накопления в растениях зависят от генотипа, почвенно-климатических условий и технологии выращивания (табл. 4.2.8).

Таблица 4.2.8 – Доля азота удобрения в нитратах бобовых и злаковых растениях в зависимости от доз азотных удобрений (Андрианова, Барсуков, 1998)

Растение	Доля $^{15}\text{N}$ - $\text{NO}_3^-$ удобрения в нитратах, %		
	$\text{N}_{40}$	$\text{N}_{80}$	$\text{N}_{120}$
Вика	1,8–6,5	7,5–8,8	10,4–24,3
Люцерна	0,7–1,2	3,0–5,6	5,3–6,4
Овес	6,5–8,2	8,8–16,5	10,4–19,8
Кострец	1,4–3,7	2,1–3,9	2,1–4,4

С повышением доз азотных удобрений доля азота удобрения в нитратах возделываемых культур увеличивалась и достигала 6–24% у бобовых и 4–20% у злаковых.

Применение сточных вод животноводческих комплексов в растениеводстве решает целый ряд задач:

- повышается плодородие почв;
- увеличивается продуктивность возделываемых культур;
- предотвращается загрязнение окружающей среды, в том числе продукции и сельскохозяйственных культур.

Сточные воды промышленных комплексов по выращиванию КРС содержат значительное количество элементов питания, а сточные воды сахарных заводов обогащены кальцием, что делает эффективным их применение под люцерну (кальцефил). При применении смешанных сточных вод (сточные воды ферм КРС и сахарного завода, разведенные чистой водой в соотношении 1:1) в условиях чернозема типичного при орошении после укосов (три полива) продуктивность люцерны повышалась в 1,3–1,4 раза, а содержание  $\text{NO}_3^-$  в зеленой массе – в 1,2–2,5 раза (табл. 4.2.9).

Таблица 4.2.9 – Урожайность зеленой массы и содержание нитратов в люцерне при орошении сточными водами (Джалалзаде, 1994)

Вариант	Доза удобрений, кг/га		Урожай зеленой массы, ц/га	Содержание $\text{NO}_3^-$ , мг/кг
	оросительная норма, м <sup>3</sup> /га	поливная норма, м <sup>3</sup> /га		
Без орошения (контроль)			342	310
Полив чистой водой	950	316	490	334
Полив сточными водами	950 $\text{N}_{143} \text{P}_{29} \text{K}_{95}$	316	631	399
Полив сточными водами	1050 $\text{N}_{158} \text{P}_{37} \text{K}_{105}$	350	694	411
Полив сточными водами	1160 $\text{N}_{174} \text{P}_{41} \text{K}_{116}$	387	699	602
Полив сточными водами	1280 $\text{N}_{192} \text{P}_{45} \text{K}_{128}$	427	714	824
$\text{НСРО}_5$			41	

Примечание: ПДК содержания  $\text{NO}_3^-$  в зеленой массе составляет 500 мг/кг сырого вещества.

Орошение сточными водами в норме 1160 м<sup>3</sup>/га и выше приводило к накоплению нитратов в зеленой массе люцерны больше ПДК, что делает невозможным их применение.

В условиях легких песчаных и супесчаных почв сераделла является полноценным источником растительного белка, аминокислот, витаминов и минеральных солей. Однако из-за медленного ее развития в начале вегетации создаются благоприятные условия для развития сорняков. Агротехнические приемы не обеспечивают решения вопросов борьбы с сорняками, поэтому необходим химический метод. В условиях дерново-подзолистой песчаной почвы арезин и гербан подавляли рост сераделлы, 20–25% растений погибли (табл. 4.2.10).

Таблица 4.2.10 – Влияние гербицидов на развитие сераделлы (Куриленко, 1972)

Вариант	Доза гербицидов, кг/га	Зеленая масса		Корневая система	
		г/делянки	% к контролю	г/делянки	% к контролю
Контроль	-	9,2	100	9,9	100
Арезин	1,0	8,8	95,5	4,6	46,5
Гербан	1,0	7,1	76,8	6,9	69,7
Эптам	3,5	10,2	110,9	10,4	105,1
Эптам + арезин	3,5+0,5	9,1	98,7	9,2	92,9

Особенно сильно подавлял рост корней сераделлы арезин. Под действием гербана масса корней снижалась на 30%, зеленой массы – на 23%. При применении эптама (3,5 кг/га) сераделла не испытывала токсического действия препарата. Смесь эптама с арезином снижала массу корней на 7% (Куриленко, 1972). Арезин и эптам снижали (на 0,5–0,7%) содержание сырого белка в зеленой массе сераделлы и не влияли на формирование сухого вещества и количество каротина по сравнению с ручной прополкой. Эптам и его смеси не оказывали негативного действия на содержание сырого белка и каротина в зеленой массе.

Однако применение эптама (3,5 кг/га) вызывало накопление незначительного количества препарата в зеленой массе (МДУ гербицидов в продукции составляет 0,1 мг/кг) (табл. 4.2.11). Несколько больше препарата содержалось в зеленой массе при применении смеси эптам+арезин. Виды бобовых обладают неодинаковой способностью поглощать и накапливать тяжелые металлы. Например, у фасоли по способности аккумуляции тяжелых металлов установлена следующая последовательность: Cd>Zn>Ni>Co.

Уровень накопления тяжелых металлов определяется биологическими особенностями культуры, физиологической ролью элемента, его содержанием в почве в доступной форме.

Таблица 4.2.11 – Остаточное количество гербицидов в зеленой массе сераделлы (Куриленко, 1972)

Препараты	Доза гербицида, кг/га	Остаточное количество гербицидов
Арезин	1,0	0
Гербан	1,0	0
Эптам	2,5	0
Эптам	3,5	0,0133
Эптам+арезин	2,5+0,5	0
Эптам+арезин	3,5+0,5	0,0144

При одинаковых условиях загрязнения почвы в сене люцерны накапливалось большее количество цинка по сравнению с горохами равное с ним количество кадмия (табл. 4.2.12–4.2.14). На естественном фоне загрязнения почвы люцерна проявила большую чувствительность накопления свинца в сене, хотя по мере усиления загрязнения в сене накапливалось меньше свинца, чем в соломе гороха.

Таблица 4.2.12 – Влияние уровня загрязнения почвы на содержание цинка в растениях, мг/кг абс. сух. в-ва (Соколов и др., 2008)

Продукция	Подвижный цинк в почве, мг/кг			
	0,3 (фон)	70	130	180
<i>Горох</i>				
Зерно	28,0	34,1	40,1	46,2
Солома	16,3	27,9	36,1	40,7
<i>Люцерна</i>				
Сено	24,1	37,5	50,9	64,4

Таблица 4.2.13 – Влияние уровня загрязнения почвы на содержание кадмия в растениях, мг/кг абс. сух. в-ва (Соколов и др., 2008)

Продукция	Подвижный цинк в почве, мг/кг			
	0,35 (фон)	1,10	1,80	2,50
<i>Горох</i>				
Зерно	0,102	0,139	0,176	0,213
Солома	0,209	0,432	0,592	0,687
<i>Люцерна</i>				
Сено	0,316	0,433	0,550	0,667

По мере увеличения загрязнения почвы тяжелыми металлами в зерне гороха содержалось больше цинка и меньше меди, кадмия и свинца по сравнению с соломой. При естественном состоянии почвы люцерна накапливала большее количество свинца в сене, чем в соломе гороха. При увеличении загрязнения люцерна проявила большую устойчивость: в ее сене содержалось меньше тяжелых металлов, чем в соломе гороха. Представители семейства бобовых накапливают наименьшее количество ртути, в то время как наибольшее количество ее содержится в растениях семейства молочайных и пионовых (Скрипниченко и др., 1981, 1988).

Таблица 4.2.14 – Влияние уровня загрязнения почвы на содержание свинца в растениях, мг/кг абс. сух. в-ва (Соколов и др., 2008)

Продукция	Подвижный цинк в почве, мг/кг			
	0,7 (фон)	25	50	80
<i>Горох</i>				
Зерно	0,42	0,59	0,76	0,93
Солома	2,19	5,78	7,89	8,51
<i>Люцерна</i>				
Сено	4,89	5,53	5,90	6,19

В зависимости от степени загрязнения окружающей среды меняется характер накопления ТМ в различных органах бобовых растений (Соколов,

Черников, 1999; Соколов и др., 2008; Гурина и др., 2014). Так, створки бобов гороха, люпина и фасоли накапливали большее количество тяжелых металлов по сравнению с семенами (табл. 4.2.15). Фасоль аккумулировала больше свинца, цинка и меньше меди во всех частях плодов по сравнению с горохом и люпином.

Экологически безопасная технология выращивания фасоли (сорт Рубин) в условиях орошения на светло-каштановой засоленной почве (обработка семян микробиологическими препаратами 635а и ФК-6) обеспечивала формирование урожая семян с пониженным содержанием ТМ (Тютюма, Бондаренко, 2017).

Таблица 4.2.15 – Распределение тяжелых металлов в плодах бобовых растения (Соколов и др., 2008; Гурина и др., 2014)

Части плода	Тяжелые металлы, мг/кг сух. в-ва			
	Pb	Cd	Zn	Cu
<i>Горох</i>				
Семя	0,5	0,01	35,0	15,0
Створки бобов	1,0	0,01	49,7	27,5
<i>Люпин</i>				
Семя	1,03	0,14	38,0	4,29
Створки бобов	1,47	0,22	42,7	7,50
<i>Фасоль</i>				
Семя	2,0	0,01	60,0	15,0
Створки бобов	2,5	0,01	75,0	20,0

В продукции бобовых растений содержится различное количество микроэлементов. Так, повышенным содержанием бора отличаются: семена сои – 1,58; гороха – 0,81; фасоли – 0,38 мг/100 г. Отдельные культуры накапливают неодинаковое количество йода, мкг/кг сырого в-ва: горох – 211; фасоль – 103; чечевица – 101. Селен аккумулируется преимущественно в пограничных тканях плодов: во внутренней части семени чечевицы – 30,5 мкг/кг; тогда как в его кожуре – 1032 мкг/кг.

Бобовые растения обладают неодинаковой устойчивостью к радиации, поэтому в их продукции накапливается разное количество радионуклидов. Содержание радионуклидов в бобовых отдельных видов различается в 10–15 раз, а по концентрации  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  образуют следующий ряд: люпин > вика > горох > соя > бобы, фасоль.

Коэффициент накопления  $^{137}\text{Cs}$  составляет: у бобов, сои – 0,19–0,28; у гороха – 0,30–0,34; у вики в зерне – 0,42, в соломе – 0,71; у люпина в зерне – 1,97, в соломе – 1,22 (Ильин и др., 1996).

Выведение новых малоалкалоидных сортов узколистного люпина позволяет создать прочную кормовую базу (зеленый корм, силос, концентраты) (Агеева и др., 2001; Лихачев и др., 2004; Харкевич и др., 2011). Минеральные удобрения ( $\text{P}_{20-60}\text{K}_{40-120}$ ) в сочетании с пестицидами (прометрин) повышали продуктивность кормового узколистного люпина (сорт Кристалл) в условиях дерново-подзолистой песчаной почвы (гумус 2,1–2,5%, pH 6,7–6,9) (табл. 4.2.16).

Содержание сырого белка в зеленой массе люпина возросло под действием органической и органоминеральной системы удобрения. В то же время удобрения и пестициды не оказывали существенного действия на содержание сырой клетчатки и сырого жира в зеленой массе люпина. Под действием фосфорных и калийных удобрений, внесенных совместно, концентрация  $\text{NO}_3^-$  в зеленой массе несколько возросло, хотя и не превышало их ПДК в кормах (Черников, Соколов, 2009).

Таблица 4.2.16 – Урожайность и качество зеленой массы люпина при использовании удобрений, пестицидов и их сочетаний (Харкевич и др., 2011)

Вариант	Урожай, ц/га	Сырой белок, %	Азот общий, %	Переваримый протеин, г/кг	Сырая клетчатка, %	Сырой жир, %	Нитраты, мг/кг	$^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг
Контроль	104	17,1	2,74	85,35	21,4	1,73	365	345
Последствие навоза	115	17,8	2,85	97,45	22,4	1,92	357	181
Последствие навоза + $\text{P}_{30}\text{K}_{40}$	124	17,7	2,83	98,35	21,9	1,94	399	159
$\text{P}_{30}\text{K}_{40}$	128	17,7	2,83	93,00	21,3	1,91	371	176
$\text{P}_{40}\text{K}_{80}$	137	18,2	2,91	94,85	21,7	1,98	421	133
$\text{P}_{60}\text{K}_{120}$	155	18,4	2,94	100,9	22,7	2,06	438	99
Последствие навоза + $\text{P}_{30}\text{K}_{40}$ + пестициды	152	18,4	2,94	98,05	21,8	2,03	429	144
$\text{P}_{30}\text{K}_{40}$ + пестициды	138	17,6	2,82	92,70	21,8	1,93	395	165
$\text{P}_{40}\text{K}_{80}$ + пестициды	158	17,9	2,86	95,25	21,9	2,10	468	133
$\text{P}_{60}\text{K}_{120}$ + пестициды	174	18,3	2,93	99,1	22,5	2,21	474	98
$\text{НСР}_{05}$	24							

Количество  $^{137}\text{Cs}$  в зеленой массе кормового люпина зависело от погодных условий, применяемых удобрений и средств защиты растений. Влажные годы способствуют накоплению  $^{137}\text{Cs}$  в биомассе люпина. Минеральные и органические (в последствии) удобрения снижали содержание  $^{137}\text{Cs}$  в биомассе люпина в 2–2,6 раза (Харкевич и др., 2011). Возрастающие дозы фосфорных и калийных удобрений (внесенные совместно) способствовали уменьшению количества  $^{137}\text{Cs}$  в зеленой массе в 1,8–3,6 раза, тогда как прометрин не влиял на этот показатель. Фосфорные и калийные удобрения (в дозе  $\text{P}_{60}\text{K}_{120}$ ) обеспечивали содержание  $^{137}\text{Cs}$  в зеленой массе люпина ниже норматива.

Для получения экологически безопасной продукции эспарцета (зеленая масса, сено) его можно выращивать без ограничений при плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  сельскохозяйственных угодий до 40  $\text{Ки}/\text{км}^2$  (Щур, 2016).

Таблица 4.2.17 – Предельные плотности загрязнения дерново-подзолистой почвы  $^{90}\text{Sr}$  для производства экологически безопасных кормов на основе эспарцета,  $\text{Ки}/\text{км}^2$  (Щур, 2016)

Вариант	Сено		Зеленая масса	
	для цельного молока	для молока-сырья	для цельного молока	для молока-сырья
Контроль	1,6	7,8	0,22	1,1
$\text{P}_{80}\text{K}_{140}$	2,1	10,6	0,30	1,5
$\text{P}_{80}\text{K}_{180}$	1,8	9,2	0,26	1,3

Выращивание эспарцета для получения цельного молока возможно на землях, загрязненных  $^{90}\text{Sr}$  до  $0,3 \text{ Ки/км}^2$ , а молока-сырья – при плотности не более  $1,3 \text{ Ки/км}^2$  (табл.4.2.17). Производство сена для получения цельного молока возможно при плотности загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  не выше  $1,6 \text{ Ки/км}^2$ . При более высокой плотности и при нарушении технологии выращивания эспарцета возникает риск получения загрязненной продукции.

Следовательно, экологическое значение эспарцета состоит в том, что его выращивание на сено для получения молока-сырья не имеет ограничений по плотности загрязнения радионуклидами  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  сельскохозяйственных земель, представленных дерново-подзолистыми супесчаными почвами.

**Выводы.** В питании человека и кормлении сельскохозяйственных животных отмечается явный дефицит белков. Необходимы высокие затраты кормов на единицу животноводческой продукции. Эколого-агрохимические основы оптимизации качества урожая бобовых растений включают систему агротехнологий, максимально адаптированных к почвенным и экологическим условиям.

Продукция бобовых отличается повышенным содержанием белков, низким уровнем нитратов и высокой усвояемостью (60–80%) питательных веществ сельскохозяйственными животными. При этом стоимость белков бобовых растений в 2–3 раза меньше, чем белков злаковых культур. Белковый комплекс бобовых отличается высокой долей (60–70% от общего азота) легкоусвояемых белков (альбуминов, глобулинов) и отсутствием проламинов. Целый ряд бобовых растений (бобы, донник, сераделла, эспарцет) являются продуктивными медоносами.

Качество урожая бобовых культур – это строго индивидуальный, комплексный и интегральный показатель, отражающий взаимодействие и воздействие множества факторов на поступление, усвоение, метаболизм, транспорт и накопление элементов питания и их соединений в конкретных почвенно-климатических условиях.

Зерно бобов содержит 20–40% белков, зеленая масса – 9–29%. Они отличаются высоким содержанием аминокислот, %: аргинина – 8,05; тирозина – 3,15; лизина – 2,22; гистидина – 2,56; метионина – 1,58. На одну кормовую единицу зеленой массы приходится 120–130 г переваримого белка. Белки бобов отличаются высокой растворимостью, переваримостью и усвояемостью.

Зерно вики содержит 25–34%, а наземная масса – 23–27% сырого белка. Зерно и зеленая масса вики имеют горьковатый вкус, обусловленный наличием гликозида вицианина. Выведены новые сорта с его пониженным содержанием. В смешанных посевах вика способствует повышению содержания белка в овсе и пшенице.

В зерне гороха 20–36% сырого белка. Выделено три легкорастворимых белка: леугемелин, легулин, вицилин. Усвояемость белков зерна гороха составляет 83–87%, выход крупы из зерна – 76–78%. Горох является источником кормов для животных (зеленая масса, сено, травяная мука). Содержание белков в зерне гороха повышается под действием фосфорных и калийных удобрений.

В сене донника 16–21% белка. В отличие от сераделлы, у донника вегетативная масса после цветения быстро грубеет и теряет кормовую ценность. Донник белый содержит меньше кумарина, поэтому шире используется на корм, чем донник желтый.

Сено клевера считается высококачественным грубым кормом для всех видов сельскохозяйственных животных. В нем 16–21% сырого белка. В 100 кг зеленой массы – 21 кормовая единица, 2,7 кг переваримого белка, 4 г каротина, 380 г кальция и 70 г фосфора. Клевер включают в многокомпонентные травосмеси со злаковыми растениями (тимофеевкой, кострцом, мятликом). Азотные удобрения повышают содержание сырого белка в злаковом компоненте и снижают его количество в клевере. В сене козлятника 16–25% сырого белка, а по аминокислотному составу он близок к люцерне. В 100 кг сена 57–58 кормовых единиц. На одном месте козлятник возделывают 8–9 лет, при этом урожайность зеленой массы доходит до 700–800 ц/га.

По количеству белков в продукции (35–48% в зерне, 20–22% в зеленой массе) люпин превосходит ряд бобовых культур (горох, вику, бобы), а по качеству и усвояемости белков уступает только сое. Содержание белков в зерне люпина может быть свыше 60%. По концентрации незаменимых аминокислот белки зерна люпина в 1,5–4 раза превосходят белки семян злаковых культур. Белок люпина характеризуется самой высокой переваримостью крупным рогатым скотом (91%). Использование люпина на корм животным ограничивается наличием в семенах и зеленой массе до 2% алкалоидов. Однако уже выведены безалкалоидные сорта.

В сене люцерны 19–21% сырого белка, 28–30% клетчатки, 45–46% БЭВ, 6–7% золы. В 1 кг зеленой массы люцерны содержится 0,21 кормовой единицы, 29 г переваримого белка, 50 мг каротина, 3,8 г кальция, 0,8 г фосфора. Люцерну используют для создания долголетних пастбищ (свыше 10 лет).

По питательной ценности сено лядвенца превосходит клеверное. В нем 21–25% сырого белка, в 100 кг зеленого корма – 25,7 кормовой единицы. Корм из лядвенца не приводит к избыточному ожирению животных, не вызывает тимпаний и метеоризма.

Бобово-злаковые травы – высокобелковый корм для животных. По содержанию ряда аминокислот (валин, треонин и фенилаланин) белки бобовых трав не уступают яичному белку, а по количеству триптофана и лейцина превосходят его. Углеводный комплекс трав представлен крахмалом, сахарами, гемицеллюлозой, клетчаткой. Фракция сырой клетчатки включает лигнин (10–14% на сухое вещество). В травах в наибольшем количестве содержатся каротиноиды, аскорбиновая кислота и витамин В<sub>12</sub>. В смешанных посевах повышается доля белков в злаковом компоненте за счет азотфиксации бобового компонента.

В семенах нута содержится 12–33% сырого белка, 60% БЭВ и 7% жира. В листьях и стеблях нута присутствует значительное количество органических кислот (щавелевая, яблочная), что не позволяет использовать зеленую массу на корм животным, за исключением овец и свиней. Бобы нута при созревании не растрескиваются, но при перестое опадают.

Сено сераделлы содержит 15–17% сырого белка, оно богато фосфором, кальцием, калием, каротином, в нем 48 кормовых единиц. По кор-

мовым свойствам сено сераделлы не уступает клеверному. Полное минеральное удобрение повышает содержание жира, клетчатки, каротина и золы в сене. Соотношение К:Са+Mg в сене сераделлы находится в пределах нормы.

Зерно сои включает в себя 27–55% сырого белка, 18–27% жира, 9–11% сахаров. Ее белок отличается хорошей растворимостью в воде и высокой усвояемостью. По биологической ценности белки сои приравнивают к белкам коровьего молока. По содержанию незаменимых аминокислот белок сои богаче белков других зерновых бобовых культур. Его содержание в зерне сои обратно пропорционально количеству жира. Лимитирующая аминокислота в белках семян сои – метионин. Ценным веществом семян сои является лецитин.

В зерне фасоли 17–32% сырого белка, 55% крахмала и 4–6% сахаров. Для семян фасоли характерно высокое содержание белков в семенных оболочках (10–11%). В ее зеленых бобах содержится большое количество жира, сахаров, витаминов. Овощную фасоль используют для приготовления большого ассортимента блюд, она служит сырьем для консервной промышленности.

Чечевица по содержанию белка (18–30%) и развариваемости зерна превосходит горох, нут и фасоль. На корм животным используют солому и полону. В соломе 11–14% белка, и по питательной ценности она приближается к луговому сену. В полове чечевицы белка больше (16–18%), чем в зерне овса и ржаных отрубях. Зерно чечевицы используют в пищу в свежем и консервированном виде.

Содержание белка в семенах чины колеблется в пределах 26–32%, в зеленой массе – 15–21%. Благодаря высокому содержанию белков, сахаров, воды и меньшему количеству клетчатки кормовая ценность зеленой массы чины сохраняется более длительный период, чем у других бобовых культур. Чину луговую используют для создания долголетних лугов, которые сохраняют высокую продуктивность в течение 8–10 лет.

Эспарцет по кормовой ценности превосходит люцерну и клевер. В сене эспарцета содержится 15–21% белка, 3–6% сахаров и 90–170 мг/кг каротина. В 100 кг зеленой массы 18 кормовых единиц, 2,8 г переваримого белка, 240 г кальция, 60 г фосфора. Зеленую массу и сено эспарцета используют в кормлении всех видов животных. Продолжительность жизни эспарцета на одном месте 3–4 года.

Локальное, региональное и глобальное загрязнение окружающей среды ведет к нарушению биогеохимических циклов элементов в агроэкосистемах, что ставит под угрозу получение экологически безопасной продукции растениеводства и животноводства. Содержание загрязняющих веществ в агроэкосистеме зависит от величины (дозы) поступления и скорости их деградации. Загрязнение продукции бобовых растений вредными веществами обусловлено множеством взаимосвязанных, протекающих с разной скоростью процессов в сопряженных средах и компонентах агроэкосистем. В настоящее время 70% современных экосистем загрязнены в той или иной степени. Поэтому в современных условиях производства получить абсолютно экологически чистую продукцию невозможно.

В семенах и зеленой массе бобовых растений содержатся токсины природного происхождения, которые снижают пищевую и кормовую ценность продукции. К ним относятся: ингибиторы протеаз, лектины, авитамины, алкалоиды, гликозиды, зобогенные вещества. Из семян бобовых растений выделен целый ряд протеаз: пепсин, трипсин, соин, химотрипсин. Лектины гороха, фасоли и чечевицы стимулируют деление клеток и агглютинируют раковые клетки. Содержание алкалоидов в зерне новых сортов люпина колеблется в пределах 0,03–0,05%, в зеленой массе – в пределах 0,01–0,04%, что позволяет использовать их для производства зеленых, сочных и концентрированных кормов для всех видов животных. Из семян гороха выделены авитамины биотина и пантотеновой кислоты; из семян сои – липоксидаза, окисляющая каротин; дикумарин (дикумарол) в семенах донника приводит к снижению уровня протромбина у животных. Содержание фитина в семенах бобовых составляет 1,6–2,6%, он образует труднорастворимые комплексы с ионами цинка, железа, меди. Опасность гликозидов бобовых культур обусловлена синильной кислотой, которая выделяется при их гидролизе. В семенах вики и фасоли содержится вицианин (0,3–0,7%).

Бобовые растения не накапливают в урожае значительных количеств нитратов. Минимальное количество  $N-NO_3^-$  содержится в зерне гороха и сои; в люпине нитраты отсутствуют. В этих же культурах содержится минимальное количество нитритов (0,20–0,61 мг/кг сырого вещества).

В условиях дерново-подзолистой почвы азотные удобрения повышали содержание  $NO_3^-$  в бобово-злаковых травах, тогда как фосфорные удобрения снижали их количество. Калийные удобрения и бесподстилочный навоз (в дозах не выше 90 кг N/га) не влияли на концентрацию нитратов в травосмеси. Внесенные локально азотные удобрения снижают на 10–12% количество нитратов в бобово-злаковых травах по сравнению с разбросным способом их применения. Наличие бобового компонента способствует уменьшению количества  $NO_3^-$  в тимфеевке. В условиях чернозема выщелоченного наибольшее количество нитратов аккумулирует горох, наименьшее – эспарцет. Нитраты в растениях накапливаются в основном за счет азота почвы (70–95% от общего количества  $NO_3^-$ ). Под действием сточных вод ферм КРС в сене люцерны возможно накопление нитратов выше ПДК.

Применение пестицидов подавляет синтез белков в фитомассе сераделлы, тогда как энтам не влияет на их накопление. Однако незначительное количество энтама накапливается в биомассе сераделлы, остаточное его количество повышается при применении смеси энтам+арезин.

Уровень аккумуляции ТМ определяется биологическими особенностями возделываемой культуры и физиологической ролью элемента. Для фасоли установлен ряд в отношении накопления тяжелых металлов:  $Cd > Zn > Ni > Co$ . Люцерна потребляет больше цинка по сравнению с горохом. По мере усиления загрязнения содержание цинка в зерне гороха превышало его количество в соломе, тогда как свинца и кадмия накапливалось больше в соломе. С нарастанием загрязнения люцерна проявляет большую устойчивость: в ее сене содержится меньше тяжелых металлов, чем в соломе гороха.

Загрязнение окружающей среды меняет характер накопления тяжелых металлов в органах бобовых растений. Створки бобов гороха, люпина и фа-

соли аккумулируют большее количество тяжелых металлов по сравнению с семенами. Инокуляция семян активными штаммами бактерий снижает накопление тяжелых металлов в урожае фасоли.

По способности к накоплению радионуклидов бобовые растения располагаются в последовательности: люпин>вика>горох>soя>бобы, фасоль.

Влажные годы способствуют накоплению  $^{137}\text{Cs}$  в биомассе люпина. Минеральные и органические удобрения снижают содержание  $^{137}\text{Cs}$  в фитомассе люпина, фосфорные и калийные удобрения действуют более эффективно.

Эколого-агрохимические основы оптимизации качества урожая бобовых растений включают систему агротехнологий, максимально адаптированных к почвенным и экологическим условиям. Зерно бобовых культур содержит 15–55% сырого белка, сено (солома) – 15–25%; в их массе – повышенное количество сахаров, каротина и витаминов, зольных солей. Бобовые культуры служат источником питания человека, а также идут на приготовление кормов сельскохозяйственным животным (зеленый корм, сено, сенаж, травяная мука, брикеты, гранулы). Клевер, люцерну, козлятник используют для производства многокомпонентных травосмесей и создания долголетних пастбищ. Эти культуры отличаются долголетием выращивания на одном месте.

В семенах и зеленой массе бобовых содержатся токсины природного происхождения (ингибиторы протеаз, алкалоиды, гликозиды, лектины, антивитамины, зобогенные вещества). В продукции бобовых культур накапливается незначительное количество нитратов и нитритов. При нарушении технологии выращивания возможно накопление  $\text{NO}_3^-$ , остатков пестицидов и тяжелых металлов. Люпин отличается повышенным уровнем накопления радионуклидов. Фосфорные и калийные удобрения снижают содержание  $^{137}\text{Cs}$  в урожае бобовых.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бобовые растения, обладая широким ареалом распространения, способностью почвообразования и азотфиксации, средообразующим, секвестрирующим эффектом и энергосбережением, отличаются высокой экологической пластичностью и устойчивостью к действию природных и антропогенных факторов.

Тройной симбиоз (симбиотический, ассоциативный, микоризный), смена значимости симбиотрофного и автотрофного способов усвоения азота, использование труднодоступных соединений фосфатов, участие макро- и микроэлементов в формировании аппарата азотфиксации, оптимизация комплементарных пар симбионтов обеспечивают устойчивую продуктивность бобовым растениям. Взаимоотношения бобовых растений со злаками обуславливают формирование высокопродуктивных экологически и экономически эффективных агрофитоценозов.

Активность симбиотической азотфиксации является высокочувствительным индикатором состояния и доступности элементов питания в почве, степени загрязнения природной среды газами, тяжелыми металлами, пестицидами, радионуклидами. Азотфиксация усиливает устойчивость бобовых растений к негативному действию различных факторов. Эти культуры служат фитопротекторами: люцерна при засолении, люпин при радиационном загрязнении почв.

Формируя экологически безопасную продукцию, бобовые растения служат уникальным источником легкоусвояемых белков и энергии, витамина В<sub>12</sub>. Многие виды – хорошие медоносы.

В продукции бобовых растений содержатся вещества природного происхождения (ингибиторы протеаз, алкалоиды, гликозиды), снижающие усвоение питательных веществ теплокровными организмами. При нарушении технологии выращивания возможно накопление загрязняющих веществ в биомассе бобовых растений.

## Литература

1. *Абдушаева Я.М., Рагимов К.Н., Покровская Е.В.* Азотфиксирующая способность многолетних бобовых трав в условиях Новгородской области // *Плодородие*. 2008. №1. С. 27–28.
2. *Авакумова Е.Н., Арутюнян С.А.* Взаимодействие клубеньковых бактерий с оболочкой изолированных клеток корней гороха и люцерны // *Биол. журн. Армении*. 1987. Т. 40. №4. С. 285–289.
3. *Авдонин Н.С.* Почва, растение и белок // *Агрохимия*. 1975. №9. С.3–13.
4. *Агеева П.А., Борисова С.Н., Царанева Ж.В.* Результаты и перспективы селекции узколистного люпина // *Кормопроизводство*, 2001. №1. С. 13–16.
5. *Адреанов И.Н.* Старение клубеньков бобовых // *Физиол. растен.*, 1998. Т. 45. №1. С. 117–130.
6. *Азаров В.Б., Акулов П.Г., Азаров Б.Ф.* Влияние типов севооборотов, способов основной обработки почвы и уровень удобрённости на содержание минерального азота в черноземе типичном // *Агрохимия*. 2003. №3. С.5–7.
7. *Алейникова Л.Д.* Баланс азота люпина, внесённого в почву под озимую пшеницу в полевых условиях // *Бюл. ВИУА*. М.: 1974. С. 16–18.
8. *Александрова Л.Н., Люжин М.Ф.* Влияние условий разложения на соотношение процессов минерализации и гумификации растительных остатков. Гумус и биологическая аккумуляция элементов в почве. Л., 1966. Т. 105. Вып. 1. С. 19–29.
9. *Аленин П.Г., Двойникова О.И.* Технология возделывания гороха с применением регуляторов роста, бактериальных препаратов и комплексных удобрений с микроэлементами в форме хелатов // *Плодородие*. 2011. №6. С. 3–6.
10. *Алисова С.М., Тихонович И.А.* Использование хлорофильных мутантов гороха в качестве модели для изучения взаимосвязи между фотосинтезом и симбиотической азотфиксацией // *Генетика*. 1983. Т. 19. №9. С. 1512–1517.
11. *Алферов А.А., Чернова Л.С.* Влияние сидерата и ризоагрина на продуктивность яровой пшеницы и трансформацию азота удобрения // *Кормопроизводство*. 2017. №12. С. 8–11.
12. *Андреева Е.А., Щеглова Г.М., Середкина Н.Н.* Результаты полевых исследований с применением сернокислого аммония, меченого  $^{15}\text{N}$  // *Агрохимия*. 1981. №5. С. 13–14.
13. *Андреева И.Н., Кожаринова Т.М., Измайлова С.Ф.* Старение клубеньков бобовых // *Физиология растений*. 1998. Т. 45. №1. С. 117–130.
14. *Андрянов С.Н.* Формирование фосфатного режима дерново-подзолистых почв в разных системах удобрения. М.: ВНИИА, 2004. 296 с.

15. Андрианова Н.Г., Барсуков П.А. Содержание нитратов в кормовых культурах при орошении // *Агрохимия*. 1998. №1. С. 28–38.

16. Антипчук А.Ф. Использование различных показателей при оценке эффективности клубеньковых бактерий // *Микробиол. ж.*, 1985. Т. 47. №4. С. 89–90.

17. Антипчук А.Ф. Связь между показателями фотоассимиляционной активности бобовых растений и их симбиотической азотфиксацией // *Микробиол. ж.*, 1990. Т. 52. №6. С. 59–63.

18. Антонюк Л.П. Растительные лектины как факторы коммуникации всимбиоза / Молекулярные основы взаимоотношений ассоциативных микроорганизмов с растениями. М.: Наука, 2005. С. 118–159.

19. Афанасьев Р.А., Дворецкий В.В. Использование молекулярного и минерального азота бобово-злаковым травостоем в условиях дерново-подзолистой почвы. / Бобовые культуры в современном сельском хозяйстве. Новгород, 1998. С. 16–17.

20. Бабарина Э.А., Мельникова Н.М. Регулирование фосфорного и калийного режимов дерново-подзолистых почв // Тр. ВИУА. Применение удобрений и расширенное воспроизводство плодородия почв. М.: ВАСХНИЛ. 1989. С. 51–57.

21. Бабкин В.В., Завалин А.А. Физиолого-биологические аспекты действия тяжелых металлов на растения // *Химия в сельском хозяйстве*. 1995. №5. С. 17–21.

22. Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв. М.: МГУ, 1989. 335 с.

23. Бабьева И.П., Левин С.В., Решетова И.С. Изменение численности микроорганизмов в почвах при загрязнении тяжелыми металлами. / Тяжелые металлы в окружающей среде. М.: МГУ, 1980. С. 115–120.

24. Балашов В.В., Патрин И.Т., Балашов А.В. Нут – зерно, здоровье. Волгоград, 2002. 79 с.

25. Баринов В.Н., Новиков М.И. Опыт использования азота бобовых культур для подкормки многолетних трав // *Агрохимия*. 2015. №5. С. 28–32.

26. Бегун С.А. Развитие клубеньков на корнях сои в зависимости от внешней среды / Вопросы возделывания основных сельскохозяйственных культур в Амурской области. Новосибирск, 1976. С. 117–120.

27. Безносиков В.А. Трансформация азотных удобрений и их влияние на физико-химические свойства подзолистых почв и продуктивность агроценозов // *Агрохимия*. 1997. №4. С. 5–12.

28. Белкова Н.И., Донская М.В., Наумкин В.П. Медоносные смеси чины посевной с горчицей белой // *Пчеловодство*. 2016. №4. С. 22–24.

29. Белоус Н.М. Повышение плодородия песчаных почв. М.: Колос, 1997. 192 с.

30. Беляк В.Б. Влияние сидератов на продукционные процессы в севообороте // *Вест. РАСХН*. 2002. №1. С. 77–80.

31. Бердников А.М., Косянчук В.П. Возделывание картофеля с использованием сидератов // *Земледелие*. 1999. №4. С. 26–27.

32. Берестецкий О.А. Биологические основы повышения плодородия почв. Сб.: Актуальные проблемы земледелия. М.: Колос, 1984. С. 24–34.

33. Берестецкий О.А. Растительные остатки как энергетический материал при несимбиотической азотфиксации // *С.-х. биология*, 1984. №1. С. 69–71.

34. Берзин А.И., Шпедт А.А. Использование зеленых удобрений в Краснодарском крае // *Агрохимия*. 2001. №5. С. 27–32.
35. Беспалова Т.Ф. Влияние азотных удобрений и нитрагина на урожай и питательную ценность зеленой массы зернобобовых культур. / *Полевое кормопроизводство*. Горький, 1985. С. 62–65.
36. Благовещенский Г.В. Влияние многолетних трав на плодородие почвы // *Кормопроизводство*. 2003. №4. С. 20–23.
37. Благодатская Е.В. Изменение экологической стратегии микробного сообщества почвы, инициированное внесением глюкозы // *Почвоведение*. 2001. №5. С. 600–608.
38. Благодатский С.А., Благодатская Е.В., Горбенко А.Ю., Паников Н.А. Регидратационный метод определения биомассы микроорганизмов в почве // *Почвоведение*. 1987. №4. С. 64–71.
39. Блэк К.А. Растение и почва. М.: Колос, 1973. 503 с.
40. Богомазов Н.П. Влияние сочетания минеральных, органических и известковых удобрений на урожай и качество культур, продуктивность зерно – свекловичного севооборота и плодородие выщелоченных черноземов юго-западной части ЦЧЗ России. Сообщение 2. Урожай и качество культур зернокормового звена севооборота // *Агрохимия*. 1996. №11. С. 51–60.
41. Борин А.А., Коровина О.А., Лоцинина А.Э. Обработка почвы в севообороте // *Земледелие*. 2013. №2. С. 20–22.
42. Боровик А.А., Радовня В.А., Аляпкин А.В. Влияние удобрений на вынос с урожаем элементов питания и накопление в почве корневой массы галег восточной // *Пововедение и агрохимия*. 2011. №1. С. 259–265.
43. Боронтов О.К., Арбузова Т.В., Королев В.А. Агрофизические свойства чернозема выщелоченного при его обработке в паропропашном севообороте // *Земледелие*. 2010. №2. С. 24–26.
44. Буянкин Н.И., Слесарев В.Н., Красноперов А.Г. Ключевые показатели минимизации обработки // *Земледелие*. 2004. №4. С. 14–15.
45. Бызов И.С., Понамарев А.Б., Гарифьянова Р.Р. Ресурсосберегающие обработки почвы в зернотравяном севообороте // *Земледелие*. 2015. №1. С. 15–17.
46. Быстров А.В., Шмырева Н.Я. Влияние азотных удобрений на продуктивность травосмеси в условиях эрозионного ландшафта // *Агрохимия*. 2002. №6. С. 82–90.
47. Вавилов П.П. Растениеводство. М. Колос, 1979. 519 с.
48. Вавилов П.П., Посыпанов Г.С. Бобовые культуры и проблемы растительного белка. М.: Россельхозиздат, 1983. 242 с.
49. Вальков В.Ф. Почвенная экология сельскохозяйственных растений. М.: Агропромиздат, 1986. 209 с.
50. Васильчиков А.Г., Акулов А.С. Повышение продуктивности сои путем усиления симбиотической азотфиксации // *Земледелие*. 2016. №4. С. 14–16.
51. Васильчиков А.Г., Акулов А.С., Глазков А.В. Продукционная и азотфиксирующая способность различных сортов сои в Орловской области // *Земледелие*. 2015. №4. С. 7–9.
52. Верниченко И.В. Ассимиляция растениями аммонийного и нитратного азота и эндогенное образование нитратов. М.: РГАУ-МСХА, 2017. 248 с.
53. Верниченко Л.Ю., Миллер Ю.М. Влияние аммония и нитрата на усвоение молекулярного и связанного азота бобово-ризобиальным симбиозом.

Кн.: Применение  $^{15}\text{N}$  в агрохимических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1985. С. 119–122.

54. *Верниченко Л.Ю.* Влияние аммония и нитрата на усвоение азота бобово-ризобиоальным симбиозом / Применение  $^{15}\text{N}$  в агрохимических исследованиях. Сб. научных трудов Новосибирск. Наука, Сиб. отд-ние., 1988. С. 119–122.

55. *Возняковская Ю.М.* Сидераты как фактор биологизации земледелия // Земледелие. 1999. №1. С. 44–45.

56. *Возняковская Ю.М., Попова Ж.П.* Биологическая активность почвы и уровень эффективного плодородия в условиях интенсификации земледелия // С.-х. биол. 1989. №5. С. 86–89.

57. *Возняковская Ю.М., Попова Ж.П., Петрова Л.Г.* Сидеральные удобрения – регуляторы почвенно-микробиологических процессов в условиях почвоутомления // Докл. ВАСХНИЛ. 1988. №2. С. 6–9.

58. *Волошин В.А.* Предварительные итоги изучения эспарцета песчаного в Пермском крае // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2015. №1. С. 49–54.

59. *Воробьев В.А., Пигарева Т.И.* К вопросу о «стартовых» дозах минерального азота для инокулированных бобовых растений // Агрохимия. 1985. №7. С. 22–25.

60. *Воробьев С.А.* Севообороты интенсивного земледелия. М. Колос, 1979. 368 с.

61. *Высоцкая П.Н.* Влияние торфа и люпина на содержание и фракционный состав гумуса и азота в нем на дерново-подзолистой почве / Роль азота в земледелии дерново-подзолистых почв. Научн. Тр. Почв. Института им. В.В. Докучаева. М.: Колос, 1974. С. 126–145.

62. *Вэнс К.* Симбиотическая азотфиксация у бобовых: сельскохозяйственные аспекты. СПб.: Бионт, 2002. С. 541–564.

63. *Гамзиков Г.А., Дмитриев М.Н., Мальцев В.Т., Дьяченко Е.Н.* Длительное применение удобрений и извести в плодосменном севообороте на серой лесной почве Забайкалья // Плодородие. 2014. №6. С. 25–27.

64. *Гамзиков Г.П., Барсуков А.А.* Симбиотическая и несимбиотическая азотфиксация в дерново-подзолистой почве // Докл. РАСХН. 1996. №1. С. 13–15.

65. *Годова Г.В., Ницэ Л.К., Моторина М.Л.* Фотосинтез растений и несимбиотическая фиксация азота в корневой зоне // Изв. ТСХА. 1983. №1. С. 117–120.

66. *Головина Е.В., Агаркова С.Н.* Кормовая продуктивность новых сортов сои // Земледелие. 2017. №3. С. 35–37.

67. *Голопятов М.Т., Кондрашин Б.С.* Влияние минеральных удобрений, биологически активных веществ и микроудобрений на качество зерна гороха сортов нового поколения // Земледелие. 2016. №4. С. 19–21.

68. *Гребенников А.М.* Влияние смешивания посевов на микробиологическую активность почв // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2008. Вып. 61. С. 75–82.

69. *Гребенников А.М.* Фитосанитарный аспект повышения плодородия черноземов сидеральными смесями // Земледелие. 2011. №3. С. 24–26.

70. *Гришина Л.А., Конорева И.А., Фокина Г.Н.* Влияние аэрозагрязнения на биологическую активность дерново-подзолистых почв // Научн. докл. выс.шк. Биол. Науки. 1984. №12. С. 83–88.

71. Гудинова Л.Г., Савченко М.П. Влияние условий питания на фиксацию атмосферного азота гороха. Полевые культуры. Науч. труды Омского СХИ им. С.М. Кирова. Т.100. 1972. 183 с.

72. Гукова М.М. Азотофиксация у бобовых растений при внесении азотных удобрений // Изв. ТСХА. 1971. №3. С. 87–95.

73. Гукова М.М. Зависимость симбиотического усвоения азота бобовыми растениями от температуры // Изв. АН СССР. Сер. Биол. 1962. Вып.6. С. 832–839.

74. Гукова М.М. Источники питания бобовых растений азотом и их использование в онтогенезе // Докл. ТСХА. 1974. Вып. 203. С. 39–57.

75. Гуреев И.И. Минимизация обработки почвы и уровень ее допустимости // Земледелие. 2007. №4. С. 25–28.

76. Гурина Е.Л., Кулинич Р.А. Высокопродуктивные растительно-микробные системы в агроценозах бобовых культур // Докл. РАСХН. 2015. №3. С. 28–30.

77. Гурина И.В., Гусева Т.М., Довбан К.И. Агроэкологическое обоснование ведения сельскохозяйственного производства на мелиорируемых длительно используемых нарушенных и загрязненных землях. Рязань: РГАТУ, 2014. 484 с.

78. Двойникова Е.Д. Эффективность ризоторфина в севооборотах с вики в условиях известкования выщелоченных черноземов Пензенской области / Сб. науч. ст. 48й-международной конференции «Агроэкологические основы применения удобрений в современной земледелии». М.: ВНИИА, 2014. С. 63–66.

79. Дворецкий В.В. Влияние минеральных удобрений на формирование и продуктивность сеяных злаковых травостоев в условиях мелиорированных супесчаных почв района Верхней Волги // Автореф. дисс. ... канд. с.-х. н. М.: ВИУА, 1996. 23 с.

80. Дебелый Г.А., Кирдин В.Ф., Каланчина А.С. Продуктивность яровой вики в зависимости от нормы высева в чистом и смешанных с овсом посевах // Земледелие. 2016. №1. С. 32–34.

81. Дегтярева И.А., Япаров А.Х., Чернов И.А. Специфика взаимодействия углерода и азотного метаболизма у амаранта. Казань: Центр инновационных технологий, 2006. 208 с.

82. Дегунова Н.Б., Чемяк Г.А. Однолетние бобовые культуры улучшают плодородие почвы // Плодородие. 2003. №4. С. 31–32.

83. Дедов А.А., Дедов А.В., Несмеянова М.А. Динамика разложения растительных остатков в черноземе типичном и продуктивность культур севооборота // Агрохимия. 2016. №6. С. 3–8.

84. Дедов А.В. Органическое вещество почвы и его регулирование в Центральном Черноземье. Воронеж: ВГАУ, 1999. 202 с.

85. Дедов А.В., Несмеянова М.А. Влияние многолетних трав на плодородие почв // Агрохимический вестник. 2012. №4. С. 7–9.

86. Дедов А.В., Несмеянова М.А., Хрюкин Н.Н. Приемы биологизации и воспроизводство плодородия черноземов // Земледелие. 2012. №6. С. 4–6.

87. Дедов А.В., Придворев Н.И., Верзилин В.В. Трансформация послеуборочных остатков и содержание водорастворимого гумуса в черноземе выщелоченном // Агрохимия. 2004. №2. С. 13–22.

88. Дедов А.В., Трофимова Т.А., Болучевский Д.А. Совершенствование основной обработки почвы в ЦЧР // Земледелие. 2013. №6. С. 5–7.
89. Деева В.П. Качественные изменения в дыхательной цепи митохондрий и активность ферментов цитохромной системы у растений люпина под воздействием ТХА // Доклад АН БССР, 1969. Т. 13. №6. С. 557–559.
90. Деева В.П., Шелег З.И. Физиология устойчивости сортов растений к гербицидам и ретардантам. Минск: Наука и техника, 1976. 245 с.
91. Демидов Э.Д., Павлова Е.А. Фотосинтез и ассимиляция нитрата и аммония / Преобразование световой энергии в фотосинтезирующих системах и моделях / Тез. Докл. Всесоюз. Конф. Пушино, 1989. 154 с.
92. Дерюгин И.П., Прокошев В.В. Пути оптимизации условий эффективного использования фосфорных и калийных удобрений // Агрохимия. 1990. №4. С. 39–44.
93. Джалалзаде Ф.Х., Дубудько Н.С. Орошение кормовых культур с точными водами // Земледелие. 1994. №5. С. 26–27.
94. Добровольский Г.В. Деградация почв угроза глобального экологического кризиса // Век глобализации. 2008. №2. С. 54–65.
95. Довбан К.И. Зеленое удобрение. М.: Агропромиздат, 1990. 208 с.
96. Довбан К.И. Экологические аспекты сидерации // Химизация сельского хозяйства. 1992. №4. С. 22–25.
97. Донская М.В., Донской М.М., Наумкин В.В. Возделывание чины посевной как медоносной культуры // Пчеловодство. 2016. №3. С. 31–33.
98. Донская М.В., Наумкина Т.С., Суворова Г.Н. Использование микробиологических препаратов для повышения эффективности симбиотических систем нута // Зернобобовые и крупяные культуры. 2013. №3. С. 37–42.
99. Донской М.М. Чина посевная – «привлекательная» и полезная культура // Главный агроном. 2016. №3. С. 44–45.
100. Доросинский Л.М. Конкурентная способность клубеньковых бактерий. / Биологический азот в сельском хозяйстве СССР. М.: Наука, 1989, С. 27–34.
101. Дронова Т.Н. Водный режим в зонах, прилегающих к лесополосе и плодородие почвы при возделывании люцерны // Плодородие. 2011. №4. С. 41–42.
102. Дронова Т.Н., Бурцева Н.И., Карпов М.И. Баланс питательных веществ в почве при возделывании клевера лугового на орошаемых землях Нижнего Поволжья // Плодородие. 2012. №5. С. 20–23.
103. Дронова Т.Н., Карпов М.И. Оптимизация водного и минерального питания клевера лугового в Волгоградском Заволжье // Плодородие. 2013. №4. С. 41–42.
104. Дубовенко Е.К. Эффективность ризоторфина и азотных удобрений на посевах зернобобовых культур в полесье УССР / Использование достижений микробиологической науки в повышении эффективности земледелия. Киев, 1989. С. 59–62.
105. Евдокимова Г.А., Кислых Е.Е., Мозгова Н.П. Биологическая активность почв в условиях аэротехногенного загрязнения на Крайнем Севере. Л.: Наука, 1984. 120 с.
106. Егоров В.И., Плотникова С.Ф. Азотфиксирующая способность бобовых растений, произрастающих в горной и долиной тундрах Хибин // Агрохимия. 2000. №11. С. 21–26.

107. Емцев В.Т., Ладатко А.Г. Анаэробная азотфиксация в почвах рисовых полей при внесении соломы и азотных удобрений // Изв. ТСХА. 1984. №3. С. 107–112.

108. Ефимов В.Н., Царенко В.П., Шидловская Т.П. Использование многолетних травами азота удобрений при внесении их в возрастающих нормах на торфяных низинных, освоенных почвах. Вологодской области // Агрохимия. 1983. №11. С. 3–11.

109. Жизневская Г.Я., Федорова Е.Э., Дуброво П.Н. Выделение водорода клубеньковыми бактериями в онтогенезе клевера красного // Физиология растений. 1985. №32. Вып. 4. С. 724–731.

110. Жирмунская Н.М., Маркина Л.Г. Физиолого-биохимические показатели устойчивости к гербицидам разных сортов гороха // Агрохимия. 1976. №4. С. 116–120.

111. Завалин А.А. Азотное питание и продуктивность сортов яровой пшеницы. М.: Агроконсалт, 2003. 152 с.

112. Завалин А.А. Биопрепараты, удобрения и урожай. М.: ВНИИА. 2005. 302 с.

113. Завалин А.А. Дополнительный источник азотного питания зерновых культур // Агро XXI. 1998. №11. С. 14–15.

114. Завалин А.А. Роль биологического азота в ландшафтном земледелии // Бюлл. ВИУА. 1997. №110. С. 3–4.

115. Завалин А.А., Кащуков М.В. Роль бобового предшественника в питании зерновых культур и повышение плодородия выщелоченного чернозема // Агрохимия. 1998. №12. С. 20–24.

116. Завалин А.А., Соколов О.А. Потоки азота в агроэкосистеме: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней. М.: ВНИИА, 2016. 591 с.

117. Завалин А.А., Хусайнов Х.А., Шакиров М.В. Реакция сортов ячменя на инокуляцию ризотрофином в начальный период онтогенеза // Докл. РАСХН. 1999. №5. С. 14–16.

118. Заверюхин В.И., Левандовский И.П. Производство и использование сои. Киев: Урожай, 1988. 111 с.

119. Задорожный А.Н., Семенов В.М., Ходжиева А.К. Почвенные процессы продукции, потребления и эмиссии парниковых газов // Агрохимия. 2010. №10. С. 75–92.

120. Зарьянова З.А., Кирюхин С.В., Осин А.А. Экологическая оценка различных видов и сортов многолетних трав в условиях Орловской области // Земледелие. 2016. №4. С. 39–41.

121. Захаров В.Н. Влияние длительного применения бесподстильного навоза на загрязнение почв и грунтовых вод нитратами // Почвоведение. 1993. №12. С. 123–125.

122. Захарченко И.Г., Пироженко Г.С., Шилина Л.И. Баланс азота в земледелии Украины / Круговорот и баланс азота в системе почва – удобрение – растение – вода. М.: Наука, 1979. С. 104–112.

123. Звягинцев Д.Г. Почва и микроорганизмы. М.: Изд. МГУ, 1987. 256 с.

124. Звягинцев Д.Г., Гусев В.С., Левин С.И. Изменения в комплексе почвенных микроорганизмов при антропогенных воздействиях/ Успехи почвоведения. М.: 1986. С. 64–68.

125. Звягинцев Д.Г., Добровольская Т.Г., Бабьева И.П., Чернов И.Ю. Развитие представлений о структуре микробных сообществ почв // Почвоведение. 1999. №1. С. 134–144.

126. Звягинцев Д.Г., Зенова Г.М. Экология актиномицетов. М.: ГЕОС, 2001. 278 с.

127. Земенков Н.А., Речкин Д.В., Сушкова О.В. Несимбиотическая азотфиксация и возможности ее интенсификации / Азотный обмен и продуктивность зерновых культур в условиях химизации земледелия Западной Сибири. Новосибирск, 1984. С. 71–76.

128. Золотарев В.Н. Отзывчивость на инокуляцию и применение микроудобрений новых сортов вики посевной при возделывании на семена // Докл. РАСХН., 2015. №6. С. 13–16.

129. Зуза В.С. Конкурентные взаимоотношения культурных и сорных растений в почвах // С.-х. биология. 1994. №5. С. 103–107.

130. Иванов А.И., Иванов И.А., Иванова Ж.А., Цыганова И.А., Мусеев Д.А. Азотный режим легких дерново-подзолистых почв и пути его улучшения в современных условиях // Агрохимия. 2008. №9. С. 5–15.

131. Иванов В.П. Растительные выделения и их значение в жизни фитоценоза. М.: Наука, 1973. 245 с.

132. Иванчина Н.В., Гарипова С.Р., Шавалеева Д.В., Уразбахтинова Н.А., Захарова Р.Ш., Хайруллина Р.М. Влияние штаммов *Bacillus subtilis* на продуктивность растений гороха при автономной и совместной инокуляции со штаммом *Rhizobium leguminosarum* *bv. viceae*1078 // Агрохимия. 2008. №10. С. 34–39.

133. Иванчина Н.В., Шавалеева Д.В. Поиск эндофитных штаммов *Bacillus subtilis* с комплексной биологической активностью для повышения продуктивности и устойчивости растений гороха // Аграрная Россия. 2009. №1. С. 85.

134. Ивашикина Н.В., Соколов О.А. Физиологические и молекулярные поглощения нитрата растениями // Агрохимия. 2001. №1. С. 80–92.

135. Игамбердиев А.У., Фалалеева М.И. Выделение и характеристика сукцинатдегидрогеназного комплекса митохондрий растений // Биохимия 1994. Т. 39. №8. С. 1198–1206.

136. Игнатов В.В. Молекулярные основы взаимоотношений ассоциативных микроорганизмов с растениями. М.: Наука, 2005. 262 с.

137. Ильин Л.А., Кирилов В.Ф., Коренков И.П. Радиационная безопасность и защита. М.: Медицина, 1996. 336 с.

138. Калакуцкий К.Л., Львов Н.П., Заболотный А.И. Белки семян люпина связывающие молибден, вольфрам и радионуклиды выбросов Чернобыльской АЭС // Биохимия. 1991. Т. 56. №7. С. 1220–1227.

139. Калининская Т.А. Несимбиотическая азотфиксация в почвах рисовых полей Советского Союза / Экологические последствия применения (удобрения). Пушкино. 1982. С. 23–24.

140. Калининская Т.А., Миллер Ю.М., Белов Ю.М. Изучение с помощью <sup>15</sup>N активности несимбиотической азотфиксации в почвах рисовых полей Краснодарского края // Изв. АН СССР. Сер. Биол. 1977. №4. С. 565–570.

141. Калининская Т.А., Миллер Ю.М. Трансформация в почве и использование растениями азота, фиксированного несимбиотическими микроорганизмами / Применение <sup>15</sup>N в агрохимических исследованиях Новосибирск: Наука, 1988. С. 122–123.

142. Камалова Д.А. Активность несимбиотической азотфиксации целинных и окультуренных черноземных почв Северного Казахстана / Тез. докл. 8-й Всесоюз. съезд почвоведов. Кн.: 2. Новосибирск, 1989. 218 с.

143. Карпук В.В., Сидорова С.Г. Растениеводство. Минск: БГУ, 2001. 351 с.
144. Карпушев А.И. Симбиотическая активность и продуктивность сои на черноземах Ставропольского края // Ежегодник Биологический азот. Калуга: СО ИСАФ, 1992. С. 12–26.
145. Карпунина Л.В. Роль агглютинирующих белков ризобий и азотфиксирующих бактерий при взаимодействии с растениями / Молекулярные основы взаимоотношений ассоциативных микроорганизмов с растениями. М.: Наука, 2005. С. 98–117.
146. Карпунина Л.В., Вишневецкая О.А., Богатырев В.А. Определение локализации лектиноагглютининов почвенных азотфиксирующих бактерий // Микробиология. 1995. Т. 64. №4. С. 453–457.
147. Карпунина Л.В., Савенкова Н.Н., Владимировна М.В. Агглютинины *Rizobium leguminosarum* и их роль во взаимодействии с растениями // Изв. РАН. Сер. Биол. 1996. №6. С. 698–704.
148. Карпунина Л.В., Смиян М.С., Косенко Л.В. Исследование ферментативной активности агглютининов *Rizobium leguminosarum* 252 после взаимодействия их с углеводными компонентами корней гороха // Микробиология. 2004. Т. 73. №4. С. 461–464.
149. Карягин Ю.Г. Эффективность бактеризации растений сои активными расами клубеньковых бактерий // Микробиология. 1980. Т. 49. №1. С. 141–147.
150. Каштанов А.Н., Явтушенко В.Е. Агроэкология почв склонов. М.: Колос, 1997. 240 с.
151. Клевенская И.Л. Биологическая фиксация азота. Сообщ. 5. Влияние на азотфиксацию концентрации в среде связанного азота // Изв. СО АН СССР. Сер. Биол. Наук. 1978. №6. Вып. 1. С. 16–23.
152. Клевенская И.Л. Влияние органического вещества на биологическую фиксацию азота различными типами почв Западной Сибири // Бюллетень ВНИИСХМ. 1978. №19. Вып. 1. С. 3–17.
153. Клевенская И.Л. Олигонитрофильные микроорганизмы почв Западной Сибири. Новосибирск, 1974. 220 с.
154. Клевенская И.Л. Структура ценозов несимбиотических гетеротрофных diaзотрофов и активность азотфиксации в различных почвах / Биологическая фиксация азота. Новосибирск: Наука, 1991. С. 196–213.
155. Клевенская И.Л. Фиксация азота атмосферы свободноживущими микроорганизмами. Сообщ.3. Влияние растительности на процесс фиксации азота // Изв. СО АН СССР. Сер. Биол., 1976. №5. Вып. 1. С. 49–52.
156. Клевенская И.Л., Мозжерин Н.М. актуальная активность азотфиксации и ее искусственная стимуляция. / Применение  $^{15}\text{N}$  в агрохимических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1985. С. 124–125.
157. Климашевский Э.Л. Генетический аспект минерального питания растений. М.: Агропромиздат, 1991. 415 с.
158. Ковалевич З.С. Содержание азота и аминокислот в зерне гороха при внесении микроудобрений // Агрохимия. 1991. №6. С. 60–64.
159. Ковда В.А. Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком. М.: Наука, 1975. 72 с.
160. Кожемьяков А.П. Приемы повышения продуктивности азотфиксации и урожая бобовых культур / Биологический азот в сельском хозяйстве СССР. М.: Наука, 1989. С. 8–15.

161. *Кожемяков А.П., Тихонович И.А.* Использование инокулянтов бобовых и биопрепаратов комплексного действия в сельском хозяйстве // Докл. РАСХН. 1998. №4. С. 7–10.

162. *Кожемяков М.П., Доросинский Л.М.* Эффективность использования препаратов азотфиксирующих микроорганизмов в сельском хозяйстве // Тр. ВНИИСХМ. 1989. Т. 59. С. 5–13.

163. *Кокорина А.Л., Кожемяков А.П.* Бобово-ризобияльный симбиоз и применение микробиологических препаратов комплексного действия-важный резерв повышения продуктивности пашни. С-Пб.: СПГАУ, 2010. 50 с.

164. *Колсанов Г.В., Кулихова А.Х., Корнеев Е.А.* Использование соломы для удобрения гороха на типичном черноземе лесостепи Поволжья // Агрохимия. 2002. №11. С. 43–49.

165. *Конончук В.В., Штырхунов В.Д., Тимошенко С.М.* Урожайность и азотфиксирующая способность многолетних бобовых трав // Плодородие. 2007. №3. С. 46–49.

166. *Кореньков Д.А.* Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений. М., Агроконсалт. 1999. 296 с.

167. *Косолапов В.М.* Проблемы кормопроизводства и пути их решения на современном этапе // Достиж. науки и техники АПК. 2010. №11. С. 25–26.

168. *Косолапов В.М., Трофимов И.А.* Проблемы и перспективы развития кормопроизводства // Кормопроизводство. 2011. №2. С. 4–6.

169. *Котлярова Е.Г., Лубенцов С.М.* Пищевой режим почвы под горохом в зависимости от способа ее обработки и доз минеральных удобрений // Агрхим. вестн. 2016. №3. С. 33–68.

170. *Котлярова О.Г., Котлярова Е.Г.* Продуктивность гороха в зависимости от основной обработки почвы и минеральных удобрений // Кормопроизводство. 2012. №10. С. 18–19.

171. *Котлярова О.Г., Котлярова Е.Г., Лубенцов С.М.* Влияние основной обработки на агрофизические свойства чернозема типичного в посевах гороха // Земледелие. 2012. №4. С. 27–28.

172. *Котлярова О.Г., Черенков В.В.* Накопление органического вещества сидеральными культурами и поступление питательных веществ в почву при их запашке // Агрохимия. 1998. №12. С. 15–19.

173. *Кошкин Е.И.* Физиологическая устойчивость сельскохозяйственных культур. М.: Дрофа, 2010. 638 с.

174. *Кретинин В.М.* Влияние лесных полос на питательный режим обыкновенного чернозема под озимой пшеницей // Агрохимия. 1979. №2. С. 7–10.

175. *Кретович В.Л., Брновицкая З.С., Корягина Т.И.* Восстановительное аминирование пировиноградной, щавелевоуксусной и оксипировиноградной кислот у растений // Докл. АН СССР. 1963. Т. 152. №5. С. 150–152.

176. *Кретович В.Л.* Молекулярные механизмы усвоения азота растениями. М.: Наука, 1980. 295 с.

177. *Кретович В.Л., Коган З.С.* Усвоение и превращение азота у растений / Физиология с.х. растений. М.: МГУ, 1967. Т. 2. 396 с.

178. *Круглов Ю.В., Пароменская Л.Н.* Гербициды и бобово-ризобияльный симбиоз // Изв. АН СССР. Сер. Биол.. 1986. №2. С. 238–245.

179. *Кузнецова Т.В., Семенов А.В., Иванникова Л.А., Ходжаева А.К., Семенов В.М.* Накопление азота в микробной биомассе серой лесной почвы при разложении растительных остатков // Агрохимия. 2003. №10. С. 5–14.

180. Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Ходжаева А.К. Минерализационно-иммобилизационная оборачиваемость азота в почве при разной обеспеченности разлагаемым органическим веществом // *Агрохимия*. 2006. №6. С. 5–12.
181. Кузьмичева Ю.В., Парахин Н.В. Использование биологических факторов в повышении продуктивности и реализации срезобразующего потенциала гороха посевного // *Докл. РАСХН*. 2015. №1-2. С. 31–33.
182. Кукреш Л.В. Вика яровая. Биология и култигенез. Минск: Наука и техника, 1991. 222 с.
183. Кукреш Л.В. Вика. М.: Агропроиздат, 1989. 48 с.
184. Кулик М.С., Замараев А.Т., Баринов А.И. Потери азота со стоковыми водами // *Метеорология и гидрология*. 1974. №11. С. 27–30.
185. Куликова А.Х., Захаров Н.Г., Шайкин С.В. Оптимизация круговорота биофильных элементов и воспроизводство плодородия почвы в земледелии лесостепи Поволжья при использовании осадков городских сточных вод под сидерат/ Экологические функции агрохимии в современном земледелии. М.: ВНИИА, 2008. С. 118–121.
186. Куриленко А.Т. Применение эптама и смеси его с арезоном на посевах сераделлы // *Химия в сельском хозяйстве*. 1972. №10. С. 20–23.
187. Кутузова Р.С., Сирота Л.Б., Орлова О.В., Воробьев Н.И. Использование математического анализа для оценки микробиологического состояния почв агроландшафта опыта // *Агрохимия*. 2001. №1. С. 19–33.
188. Кушниренко Ю.Д. О значении предшественника при установлении доз азотных удобрений на черноземах // *Агрохимия*. 1972. №6. С. 11–17.
189. Ладонин В.Ф. Агроэкологические проблемы комплексной химизации земледелия. М.: Агроконсалт, 2000. 87с.
190. Лазарев Н.Н. Продуктивность сортов нового поколения клевера лугового и люцерны при многоукосном использовании в условиях Нечерноземья // *Кормопроизводство*. 2005. №11. С. 5–7.
191. Лазарев Н.Н., Кольцов А.В., Авдеев С.М. Формирование урожаев многолетними бобовыми и злаковыми травами в засушливых условиях // *Доклады ТСХА*. 2003. Вып. 275. С. 196–199.
192. Лазарев Н.Н., Костинова Т.В., Беленков А.И. Влияние азотных удобрений на урожайность пастбищных травосмесей на основе райграса пастбищного // *Плодородие*. 2016. №3. С. 24–27.
193. Лазарев Н.Н., Лукьянов Н.А., Стародубцева А.М. Продуктивность сортов люцерны изменчивой нового поколения на темно-серой лесной и дерново-подзолистых почвах в условиях центрального района Нечерноземной зоны // *Кормопроизводство*. 2007. №11. С. 24–25.
194. Лазарев Н.Н., Мерзлая Г.Е. Продуктивное долголетие злаковых и бобовых трав в зависимости от кратности скашивания и удобрения // *Плодородие*. 2017. №3. С. 13–15.
195. Лазарев Н.Н., Стародубцева А.М. Влияние инокуляции и калийных удобрений на урожайность люцерно-клеверозлаковых травосмесей // *Плодородие*. 2017. №2. С. 15–16.
196. Лактионов Ю.В., Белоброва С.Н., Кожемяков А.П., Воробьев Н.И., Сергалиев Н.Х., Аменова Р.К., Тлепов А.С. Эффективность бобово-ризобияльного симбиоза нут-бактерии при использовании минеральных удобрений // *Плодородие*. 2013. №5. С. 25–26.

197. Ламанова Т.Г., Шеремет Н.В., Доронькин В.М. Особенности роста и развития клевера гибридного на вскрышных отвалах и выщелоченных черноземах Западной Сибири // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2015. №3. С. 31–43.

198. Лапа В.В., Ивахненко Н.Н., Ломонос М.М. Продуктивность и качество клевера лугового при возделывании на дерново-подзолистой супесчаной почве // Почвоведение и агрохимия. 2011. №2. С. 78–87.

199. Лапинская Э.Б. Биологическая азотфиксация и нитрагин. Вильнюс: Академия, 1998. 218с.

200. Лапинская Э.Б. Значение инокуляции бобовых растений *Rhizobium* штаммами на симбиотическую азотфиксацию и агрохимические свойства почвы // Научные труды ЛИЗ и ЛСХУ. Вильнюс: Академия, 2006. Т.93. №2. С. 3–24.

201. Лапинская Э.Б., Пяулокайте-Матузене Л.П. Влияние минерализации соломы, дозы стартового азота и инокуляции на симбиотическую азотфиксацию клевера лугового // Агрохимия. 2010. №2. С. 59–66.

202. Ласкин П.В., Хаитбаев А.Х., Ингири А.А. Инокуляция однолетних лютиков клубеньковыми бактериями в условиях Крайнего Севера // Плодородие. 2010. №2. С. 53–54.

203. Левин С.В., Гузев В.С., Асеева И.В. Тяжелые металлы как фактор антропогенного воздействия на почвенную микрофлору / Микроорганизмы и охрана почв. М.: МГУ, 1989. С. 5–46.

204. Левин Ф.И., Белозеров С.М., Диваченко С.В. Изменение параметров биологического круговорота азота, фосфора и калия при использовании промежуточных культур на дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. 1985. №9. С. 68–75.

205. Леончик О.А. Превращение в почве и использование азота зеленого удобрения / Круговорот и баланс азота в системе почва – удобрения – растения – вода. М.: Наука, 1979. С. 42–44.

206. Лисичкина Г.А., Кожевин П.А. Влияние внесения соломы на динамику численности *Rhizobium japonicum* в ризосфере, ризоплане сои и в почве // Микробиология. 1984. Т.53. №2. С. 345–347.

207. Лихачев Б.С., Савичева И.К., Агеева П.А. Селекционное обеспечение люпиносеяния России / Биологизация земледелия юга-запада России. Брянск, 2004. С. 44–58.

208. Лихтенштейн Г.И., Гвоздев Р.И., Левченко Л.А. Строение и механизм каталитического действия активных центров нитрогеназа // Изв. АН СССР. 1978. №2. С. 103–113.

209. Логинов Ю.М. Исследование фиксации азота люпином из воздуха с использованием молекулярного азота, меченного  $^{15}\text{N}$  // Агрохимия. 1966. №11. С. 21–28.

210. Лошаков В.Г. Зеленые удобрения в земледелии России. М.: ВНИИА, 2015. 300 с.

211. Лукин С.В. Агроэкологическое состояние и продуктивность почв Белгородской области. Белгород: Константа, 2011. 178 с.

212. Лукин С.В., Черников В.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Оптимизация качества урожая. Белгород: Константа, 2014. 212 с.

213. Лурье А.А. Сельскохозяйственная радиология и радиоэкология. М.: РГАУ-МСХА, 2007. 227с.

214. Лыков А.М., Прудникова А.Г., Прудников А.Д. К проблеме экологизации обработки почвы в современных системах земледелия // Плодородие. 2006. №6. С. 2–5.
215. Можайский Ю.А. Агроэкология техногенно загрязненных агроландшафтов. Смоленск: Маджента, 2003. 484 с.
216. Мамилов Ш.З., Саданов А.К., Илелетдинов А.К. Цинк в почвах и питание растений цинком // Агрохимия. 1987. №4. С. 107–117.
217. Мамченков И.П., Тацеева Р.М., Васильев В.А. Превращение в почве азота зеленого удобрения, меченого  $^{15}\text{N}$ , и использование его растениями // Бюлл. ВИУА. 1977. №33. С. 11–22.
218. Маштаков В.П., Деева В.П., Волинец А.П. Физиологическое действие гербицидов на сорт культурных растений. Минск: Наука и техника, 1967. 195 с.
219. Медведев Г.А., Балашов А.В., Хабаров А.М. Нут – хороший предшественник для озимой пшеницы и подсолнечника в Нижнем Поволжье // Плодородие. 2010. №6. С. 19–20.
220. Медведев С.С. Физиология растений. Учебник. СПб.: Изд. С.-Пб. Университета, 2004. 336 с.
221. Мерзлая Г.Е., Сереброва И.В., Вахрушева В.В., Креминская Л.И. Формирование луговых агросистем // Кормопроизводство. 2004. №1. С. 9–10.
222. Милановский Ю.Е., Шеин Е.В. Функциональная роль амфифильных компонентов гумусовых веществ в процессе гумусо-структурообразования и генезиса почв // Почвоведение. 2002. №10. С. 126–129.
223. Мильто Н.И. Клубеньковые бактерии и продуктивность бобовых растений. Минск: Наука и техника, 1982. 296 с.
224. Минеев В.Г., Ремпе Е.Х. Оценка экологических последствий применения химических средств защиты растений // Почвоведение. 1992. №12. С. 74–81.
225. Мишустин Е.Н. Азотный баланс в почвах СССР / Минеральный и биологический азот в земледелии СССР. М.: Наука, 1985. 395 с.
226. Мишустин Е.Н. Микроорганизмы и продуктивность земледелия. М.: Наука, 1972. 343 с.
227. Мишустин Е.Н., Черепков Н.И. Роль бобовых культур и свободноживущих азотфиксирующих микроорганизмов в азотном балансе земледелия / Круговорот и баланс азота в системе почва-удобрение-вода. М.: Наука, 1979. С. 9–18.
228. Мишустин Е.Н., Черепков Н.И., Калининская Г.А. О несимбиотической азотфиксации в пахотных почвах / Проблемы почвоведения. М.: Наука, 1978. С. 92–96.
229. Мишустин Е.Н., Шильникова В.К. Клубеньковые бактерии и инокуляционный процесс. М.: Наука, 1973. 287 с.
230. Мишустин Е.П., Черепков Н.И. Значение биологического азота в азотном балансе и повышении плодородия почв СССР. М.: Наука, 1989. С. 3–7.
231. Мишустин Е.П., Черников Н.И. Биологический азот в земледелии СССР // Изв. АН СССР. Сер. Биол.. 1976. 33. С. 27–35.
232. Можайский Ю.А., Тобратов С.А., Дубенок Н.Н., Пожогин Ю.П. Агроэкология техногенно загрязненных ландшафтов. Смоленск МАДЖЕНТА, 2003. 384 с.

233. *Мозжорин Н.М.* Влияние органических удобрений на развитие азотфиксирующих и олигонитрофильных микроорганизмов в различных типах почв Западной Сибири / Микробиологические исследования в Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1976. С. 110–123.

234. *Моисеев А.А., Прокина Л.Н.* Продуктивность и азотфиксирующая активность козлятника, люцерны и клевера в условиях южного Нечерноземья / Вестник сельскохозяйственной науки Мордовии. 2000. С. 103–109.

235. *Мошкова М.В.* Влияние влажности на азотфиксирующую активность дерново-подзолистых почв // Почвоведение. 1982, №1. С. 92–95.

236. *Мякушко Ю.П., Баранова В.Ф.* Соя. М.: Колос, 1984. С. 56–181.

237. *Надежкин С.М., Корягин Ю.В., Лебедева Т.В.* Гумусное состояние чернозема выщелоченного при сидерации // Агрохимия. 1998, №4. С. 29–34.

238. *Надежкин С.М., Щербаков А.П.* Антропогенная эволюция гумусного состояния черноземов лесостепи Поволжья / Антропогенная эволюция черноземов. Воронеж: ВГУ, 2000. С. 5–171.

239. *Назарюк В.М.* Баланс и трансформация азота в агроэкосистемах. Новосибирск: СО РАН, 2002. 257с.

240. *Назарюк В.М.* Почвенно-экологические основы оптимизации питания растений. Новосибирск: СО РАН, 2007. 364с.

241. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р., Кленова М.И.* Последствие биологического азота, фиксированного различными генотипами гороха // Агрохимия. 2016. №5. С. 3–10.

242. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р., Кленова М.И.* Эффективность последствие азота, фиксированного различными генотипами макросимбионта // Сибир. Экол. Журнал. 2009. №2. С. 279–286.

243. *Назарюк В.М., Сидорова К.К., Шумный В.К.* Азотный режим почв различных генотипов макросимбионта // Почвоведение. 2007. №2. С. 189–196.

244. *Наплекова Н.Н.* Аэробное разложение целлюлозы микроорганизмами в почвах Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. 270 с.

245. *Науменко Е.Т., Ковшик Е.Г., Науменко А.В.* Зерновая продуктивность сои и пшеницы в севообороте при длительном внесении удобрений // Земледелие. 2016. №4. С. 19–21.

246. *Неунылов Б.А., Слабко Ю.И.* Использование соев азота из удобрения при разных сроках его внесения // Агрохимия. 1968. №12. С. 3–10.

247. *Никитин В.В., Тютюнов С.И., Воронин А.Н.* Влияние севооборота, способов обработки, удобрений на содержание гумуса в почве // Земледелие. 2015. №7. С. 26–28.

248. *Никитина В.Е., Аленькина С.А., Пономарева Е.Г.* Изучение роли лектинов клеточной поверхности азоспирилл во взаимодействии с корнями пшеницы // Микробиология. 1996. Т. 65. №2. С. 165–170.

249. *Никульников И.М., Боронтов О.К., Кураков В.И.* В зерно-свекловичном севообороте // Земледелие. 1998. №5. С. 19–20.

250. *Новиков М.Н., Такунов И.П., Слесарева Т.Н., Баринов В.И.* Смешанные посевы с люпином в земледелии Нечерноземной зоны. М.: ООО «Столичная типография», 2008. 160 с.

251. *Новиков М.Н., Тужилин В.М., Самохина О.А.* Система биологизации земледелия в Нечерноземной зоне. Научно-практические рекомендации на примере Владимирской области. М.: Росинформагротех, 2007. 269 с.

252. Новиков М.Н., Тужилин В.М., Самохина О.А. Биологизация земледелия в Нечерноземной зоне. Владимир: ВНИПТИОУ, 2004. 260 с.
253. Новиков М.Н., Тужилин В.М., Такунов И.П. Люпин на Владимирщине. Владимир: ВНИПТИОУ, 2002. 86 с.
254. Новикова Н.Е., Зотиков В.И. Физиологические основы устойчивости сельскохозяйственных растений. Орел: Картуш, 2015, 176 с.
255. Новоселова А.С. Селекция и семеноводство клевера. М.: Агропромиздат, 1986. 199 с.
256. Образцов А.С. Потенциальная продуктивность культурных растений. М.: Росинформагротех, 2001. 503 с.
257. Обухов А.И., Бабьева И.П., Гинь А.В. Научные основы разработки предельно допустимых концентраций тяжелых металлов в почвах / Тяжелые металлы в окружающей среде. М.: МГУ, 1980. С. 20–27.
258. Одум Ю. Экология. М.: Мир, 1986. Т. 1. 346 с.
259. Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А. Об удобрении многолетних бобовых и бобово-злаковых трав азотом // Плодородие. 2007. №5. С. 12–13.
260. Орлов В.П. Использование соломы в качестве органического удобрения под зерновые культуры и ее влияние на биологическую активность почвы и симбиотическую активность / Технология возделывания зернобобовых и крупяных культур. Орел, 1981. С. 51–61.
261. Орлов В.П., Исаев А.П., Лосев С.И. Зернобобовые культуры в интенсивном земледелии. М.: Агропромиздат, 1986. 206 с.
262. Осипов А.И., Соколов О.А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Кн. 4. Роль азота в плодородии почвы и питании растений. С-Пб.: ВИЗР, 2001. 360 с.
263. Осмоловская Н.Г. Особенности поглотительной деятельности и ионный состав растений при использовании аммонийной и нитратной формы азота / Труды Биологического НИИ ЛГУ «Азотное питание и продуктивность растений». 1988. С. 66–95.
264. Осмоловская Н.Г., Иванова И.Л. Особенности транспорта и накопления ионов в растениях при нитратном и аммонийном питании бобовых // Физиология и биохимия культурных растений. 1992. Т.24. №5. С. 454–461.
265. Панков Д.М. Эффективность возделывания эспарцета песчаного в условиях лесостепи Алтая // Кормопроизводство. 2012. №10. С. 34–36.
266. Панкратова Е.М., Домрачева Л.И., Резник Е.Н. Функционирование цианобактерий на пахотных почвах Нечерноземной зоны // Почвоведение. 1989. №4. С. 45–54.
267. Парахин Н.В., Петрова Н.Н. Симбиотически фиксированный азот в агроэкосистемах // Вестник Орел ГАУ. 2009. Т.18. №3. С. 41–45.
268. Пароменская Л.Н., Кожевников А.П., Чебатарев Н.Н. Эффективность симбиотической азотфиксации сои в условиях применения гербицидов // Сельскохозяйственная биология. 1987. Т.22. №2. С. 40–45.
269. Пасынкова Е.Н. Азотное питание, урожайность и качество зерна яровой пшеницы в одновидовом и смешанном с викой посевах // Агрехимия. 2009. №2. С. 18–27.
270. Персикова Т.Ф. Продуктивность бобовых культур при локальном внесении удобрений. Горки, 2002. 326 с.
271. Петерсон Н.В., Коць С.Я., Ничик М.М. Рост люцерны и качество ее надземной массы при автотрофном и симбиотрофном питании азотом // Физиология и биохимия культурных растений. 1994. Т. 26. №3. С. 274–281.

272. *Петерсон Н.В., Ничик М.М., Коць С.Я.* Влияние минерального азота на эффективность симбиоза клубеньковых бактерий с люцерной // Микробиологический журнал. 1991. Т. 53. №1. С. 16–22.

273. *Петухов Г.Д.* Нижний предел кислотности соответствующий требованиям биологии вики и гороха / Труды НИИСХ Северного Зауралья. Тюмень, 1995. 204 с.

274. *Пигарева Т.И.* Рост и фотосинтез инокулированных растений гороха в условиях пониженной температуры почв // Известия СО АН СССР. Сер. Биол. 1990. Вып. 1. С. 86–92.

275. *Пироженко Г.С., Шилина Л.И., Коренчук Л.П.* Баланс азота минеральных удобрений в почвах Украинской ССР и пути его улучшения. Кн.: Применение  $^{15}\text{N}$  в агрохимических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1988. С. 25–26.

276. *Писковацкий Ю.М.* Люцерна для многовидовых агрофитоценозов // Кормопроизводство. 2012. №11. С. 25–26.

277. *Помазкина Л.В.* Новый интегрированный подход к оценке режимов функционирования агроэкосистем и экологическому нормированию антропогенной нагрузки, включая техногенные загрязнения почв // Успехи современной биологии. 2004. Т.124. №1. С. 66–76.

278. *Помазкина Л.В., Котова Л.Г., Лубнина Е.В.* Биогеохимический мониторинг и оценка режимов функционирования агроэкосистем на техногенно загрязняемых почвах. Новосибирск: Наука, 1999. 208 с.

279. *Попов А.А., Федорова Г.П.* Биотехнология повышения продуктивности кормовых культур без минеральных удобрений // Кормопроизводство. 2012. №2. С. 20–21.

280. *Посыпанов Г.С.* Факторы, определяющие эффективность азотфиксации бобовыми культурами / Биологический азот в сельском хозяйстве СССР. М.: Наука, 1989. С. 37–39.

281. *Посыпанов Г.С., Долгодворов В.Е., Жируков Б.Х.* Растениеводство. М.: Колос, 2007. 612 с.

282. *Посыпанов, Г.С.* Методы изучения биологической фиксации азота воздуха. М.: Агропромиздат, 1991. 300 с.

283. *Прач Н.Г., Покуленко А.П.* Особенности агротехники полевых культур в условиях левобережной Лесостепи и Северной степи УССР // Сб. науч. Тр. Харьков: Харьковский СХИ, 1983. Т. 283. С.25–29.

284. *Привалова К.М.* Продуктивность долголетних травостоев с клевером ползучим // Кормопроизводство. 2004. №2. С. 5–7.

285. *Проворная Е.Е., Селиверстова И.А.* Повышение эффективности использования биологического источника азота на пастбищах и сенокосах в луговодстве / Кормопроизводство: проблемы и пути решения. М., 2007. С. 38–46.

286. *Проворов Н.А., Борисов А.Ю., Тихонович И.А.* Сравнительная генетика и эволюционная морфология симбиозов растений с микробами – азотфиксаторами и эндомикоризными грибами // Журн. Общ. Биология. 2002. Т. 63. №6. С. 451–462.

287. *Проворов Н.А., Воробьев Н.И.* Генетические основы эволюции растительно-микробного симбиоза. СПб., 2012. 400 с.

288. *Проворов Н.А., Федоров С.Н., Самаров Б.В.* Зависимость симбиотической активности клубеньковых бактерий люцерны от метеорологических факторов // Тр. ВНИИ с.х. микробиологии. 1989. Т. 59. С. 57–69.

289. Прудников С.В. Эффективность симбиоза с клубеньковыми бактериями у новых сортов вики посевной // Кормопроизводство. 2011. №10. С. 23–24.
290. Прянишников Д.Н. Азот в жизни растений и в земледелии СССР. М.: АН СССР, 1945. 495с.
291. Прянишников Д.Н. Избранные сочинения. В.4. Т.1. Азот в жизни растений. М.: АН СССР, 1951. 494 с.
292. Прянишников Д.Н. Избранные сочинения. М.: АН СССР, 1953.Т. 2. 381 с.
293. Прянишников Д.Н. Люпин на службу социалистическому земледелию. Научн. тр. ТСХА, М., 1962. С. 5–10.
294. Прянишников Д.Н. Избранные сочинения: в ТЗ. М.: Колос, 1965. Т. 1: Агрохимия, 767 с. Т. 2: Частное земледелие: растения полевой культуры. 708 с. Т. 3: Общие вопросы земледелия и химизации. 639 с.
295. Пчелкин В.У. Почвенный калий и калийные удобрения. М.: Колос, 1966. 335 с.
296. Радиологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий // Под ред. Н.И. Санжаровой и С.В. Фисенко. М.: РАН, 2018. 278 с.
297. Родынюк И.С. Азотфиксирующая способность клубеньков бобовых и небобовых растений в зависимости от источника углерода / Микробные ассоциации и их функционирование в почвах Западной сибери. Новосибирск: Наука, 1979. С. 236–243.
298. Родынюк И.С., Клевенская И.Л. Клубеньковые образования травянистых растений Сибири. Новосибирск: Наука, 1977. 176 с.
299. Романов В.И. Взаимосвязь процессов азотификации и фотосинтеза в бобовом растении/ Биологическая фиксация молекулярного азота. Киев: Наукова думка, 1985. С. 147–154.
300. Савченко И.В., Медведев А.М., Лукомец В.М. Пути увеличения производства растительного белка в России // Вестник РАСХН. 2009. №1. С. 11–13.
301. Сагалбеков У.М., Сагалбеков Е.У. Сорта многолетних трав для Западной Сибири и Северного Казахстана // Кормопроизводство. 2012. №9. С. 29–30.
302. Сафин Х.М., Зотов А.А. Сенокосы и пастбища Урала. Уфа: Гилем, 2009. 359 с.
303. Селицкая О.В., Самохин Л.В., Блинков Е.А. Влияние засухи и низких положительных температур на взаимодействие ассоциативных бактерий с растениями огурца // Известия ТСХА. 2009. №4. С. 129–132.
304. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В. Лаборатория диагностик биологического органического вещества почвы / Методы исследований органического вещества почвы. М.: Россельхозакадемия, 2005. С. 214–230.
305. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
306. Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Кудяров В.Н. Высвобождение доступного для растений азота при минерализации активной фазы органического вещества // Почвоведение. 1995. №6. С. 132–139.
307. Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Ходжаева Н.А. Почвенная эмиссия закиси азота: влияние природных и антропогенных факторов // Агрохимия. 2004. №1. С. 30–39.

308. Семенов В.М., Ходжаева А.К. Агроэкологические функции растительных остатков в почве // *Агрохимия*. 2006. №7. С. 63–81.
309. Серегин В.В., Янишевский Ф.В., Муравин Э.А. Использование ячменем меченого азота растительной массы бобовых культур с различным соотношением С:Н при применении ингибитора нитрификации // *Агрохимия*. 2000. №6. С. 42–51.
310. Серета Н.А. Агрохимические условия воспроизводства плодородия черноземов Башкортостана. Уфа: БГАУ, 2002. 229 с.
311. Серета Н.А., Акбиров Р.А., Тарасов А.Л. Эффективность многолетних трав и сидератов в воспроизводстве агрофизических свойств чернозема // *Плодородие*. 2010. №1. С. 27–42.
312. Сидорова В.В. Биологическая фиксация атмосферного азота / Азот в земледелии нечерноземной полосы. Под ред. П.А. Сапожникова, Л.: Колос, 1973. С. 94–112.
313. Сидорова К.К. Генетические аспекты симбиотической азотфиксации. Биологическая азотфиксация. Новосибирск: Наука, 1991. С. 6–22.
314. Сидорова К.К., Шумный В.К. Создание и генетическое изучение коллекции симбиотических мутантов гороха // *Генетика*. 2003. Т. 39. №4. С. 501–509.
315. Сидорова К.К., Шумный В.К., Назарюк В.М. Симбиотическая азотфиксация: генетические, селекционные и эколого-агрохимические аспекты. Новосибирск: Гео, 2006. 134 с.
316. Сирота Л.Б. Действие корневых diaзотрофов на урожай и потребление азота рисом на фоне разных доз  $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$  / Кн.: Применение  $^{15}\text{N}$  в агрохимических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1985. С. 127–129.
317. Скворцова И.Н., Обуховская Т.Д., Заславская В.Н. Микробиологическое тестирование загрязнения почв ртутью // *Вестн. МГУ. Серия почв*. 1984. №2. С. 32–35.
318. Скочинская Н.Н., Айзенберг А.А., Антипчук А.Г. К вопросу о наличии пектинолитической активности у клубеньковых бактерий // *Микробиол. Журн.* 1990. Т. 52. №1. С. 20–23.
319. Слободяник Н.С., Слободяник Т.М., Солтина В.М. Возделывание эспарцета песчаного в условиях Амурской области // *Кормопроизводство*. 2011. №2. С. 31–33.
320. Смирнов П.М. Вопросы агрохимии азота (в исследованиях с  $^{15}\text{N}$ ). М.: МСХА, 1977. 72 с.
321. Соколов О.А. Минеральное питание растений в почвенных условиях. М.: Наука, 1980. 193 с.
322. Соколов О.А., Семенов В.М. О передаче азота растениями в агрофитоценозе // *Агрохимия*. 1983. №7. С. 3–9.
323. Соколов О.А., Семенов В.М., Агаев В.А. Нитраты в окружающей среде. Пушино: ОНТИ, 1990. 316 с.
324. Соколов О.А., Черников В.А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Кн. 1. Атлас распределения тяжелых металлов в объектах окружающей среды. Пушино: ОНТИ, 1999. 184 с.
325. Соколов О.А., Черников В.А., Лукин С.В. Атлас распределения тяжелых металлов в объектах окружающей среды. Белгород: Константа, 2008. 188 с.
326. Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Показатели циклов азота и устойчивость агроэкосистем в системах склона // *Плодородие*. 2009. №3. С. 4–6.

327. Соколов О.А., Шмырева Н.Я., Цуриков Л.Н. Изменение параметров потоков симбиотического азота при выращивании трав на склонах // Плодородие. 2010. №4. С. 4–6.
328. Соколов О.А., Семенов В.М. Теория и практика рационального применения азотных удобрений. М.: Наука, 1992. 207с.
329. Станков Н.З. Корневая система полевых культур. М.: Колос, 1964. 279 с.
330. Стрельникова Р.А. Сокращение потерь при агротехнических мероприятиях с целью предотвращения загрязнения окружающей среды. Бюл. ВИУА. М.: №108. 1991. С. 47–50.
331. Ступина Л.А. Роль симбиотического потенциала в формировании урожайности гороха на серых лесных почвах // Плодородие. 2010. №3. С. 34–36.
332. Суков А.А. Имобилизация и использование азота минеральных удобрений при внесении с растительными остатками // Агрохимия. 1975. №5. С. 13–16.
333. Суков А.А. Минерализация азота растительных остатков некоторых культур в дерново-подзолистой почве // Агрохимия. 1977. №2. С. 14–17.
334. Суков А.А. Усвоение растениями, закрепление в почве и потери азотара растительных остатков // Агрохимия. 1979. №6. С. 12–17.
335. Сычев В.Г., Соколов О.А., Завалин А.А., Шмырева Н.Я. Роль азота в интенсификации продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Экологические аспекты роли азота в продукционном процессе. М.: ВНИИА, 2012. Т.2. 272 с.
336. Сычев В.Г., Соколов О.А., Завалин А.А., Шмырева Н.Я. Экология применения органических удобрений. М.: ВНИИА, 2017. 336 с.
337. Сычев В.Г., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Роль азота в интенсификации продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Агрофизические аспекты роли азота в продукционном процессе. М.: ВНИИА, 2009. Т.1. 424 с.
338. Сычев В.Г., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Экологически безопасная технология применения удобрений на эродированных почвах. М.: ВНИИА, 2010, 40 с.
339. Сычев В.Г., Шафран С.А. Влияние агрохимических свойств почв на эффективность минеральных удобрений. М.: ВНИИА, 2012. 200с.
340. Такунов И.П. Люпин в земледелии России. Брянск: Придесенье, 1996. 372с.
341. Такунов И.П., Яговенко Л.Л., Поликарпова Н.Я. Баланс гумуса серой лесной почвы в севооборотах при разных способах использования люпина // Агрохимия. 1995. №12. С. 32–39.
342. Такунов И.П., Яговенко Л.Л., Яговенко Г.Л. Экологическая устойчивость севооборотов с люпином и ее роль в повышении урожайности и сохранении плодородия почв // Докл. РАСХН. 2000. №5. С. 27–29.
343. Тарарико А.Г., Пироженко Г.С. Баланс гумуса и питательных веществ в системе контурно-мелиоративного земледелия // Агрохимия. 1991. №8. С. 25–31.
344. Тарасов С.И., Кумеркина Н.А. Научные основы эффективного использования бесподстильного навоза под многолетние травы / Научные основы и технологии воспроизводства плодородия почв с использованием органических удобрений. М.: РАСХН, 1998. С. 57–71.

345. Тихонович И.А., Прворов Н.А. Генетика симбиотической азотфиксации с основами селекции. СПб.: Наука, 1998. 194 с.

346. Тихонович И.А., Завалин А.А., Благовещенская Г.Г., Кожемяков А.П. Использование биопрепаратов – дополнительный источник элементов питания растений // Плодородие. 2011. №3. С. 9–13.

347. Тихонович И.А., Прворов Н.А. Пути использования адаптивно-го потенциала систем «растение-микроорганизм» для конструирования высокопродуктивных агрофитоценозов // С.-х. биология. 1993. №5. С. 36–46.

348. Толмачев М.В., Гайдученко А.Н. Фотосинтетическая деятельность и продуктивность сои сорта Лидия в зависимости от технологии возделывания // Земледелие. 2015. №3. С.31–32.

349. Трегубов П.С., Зверхановский Н.В. Борьба с эрозией почв в Нечерноземье. Л.: Колос, 1981. 160 с.

350. Трепачев Е.П. Агрохимические аспекты биологического азота в современном земледелии. М.: Агроконсалт, 1999. 532 с.

351. Трепачев Е.П. Использование бобовыми азота удобрений и его влияние на симбиотическую азотфиксацию и урожай бобовых культур / Применение стабильного изотопа  $^{15}\text{N}$  в исследованиях по земледелию. М., Колос, 1973. С. 101–111.

352. Троицкая Г.Н., Северова А.Н. Оценка азотфиксирующей активности клубеньков сои / Применение  $^{15}\text{N}$  в агрохимических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1988. С. 129–131.

353. Трофимов И.А. Состояние и перспективы развития кормопроизводства в России // Кормопроизводство. 2010. №8. С. 6–9.

354. Тужилин В.М., Быкова А.В., Тысленко А.М., Новиков М. Н. Донник в Нечернозеной зоне. Владимир: ВНИПТИОУ, 2002. 69 с.

355. Тюрин И.В., Михновский В.К., Ярцева А.К. Из результатов работ по изучению азотного баланса в дерново-подзолистых почвах при их сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 1962. №8. С. 13–17.

356. Тютюма Н.В., Бондаренко А.Н. Экологически безопасные приемы возделывания фасоли в условиях орошения Астраханской области // Плодородие. 2017. №1. С.41–43.

357. Тютюнов С.И., Соловиченко В.Д., Логвинов И.В. Плодосменный севооборот – основной фактор сохранения и повышения плодородия почвы в Белгородской области // Земледелие. 2014. №2. С. 11–14.

358. Уваров Г.И. Динамика нитратов при почвозащитных способах обработки эродированного чернозема в зоне влияния лесной полосы // Агрохимия. 1997. №4. С. 23–27.

359. Удовенко Г.В. Механизмы адаптации растений к стрессам // Физиология и биохимия культурных растений. 1979. Т.11. №2. С. 99–107.

360. Удовенко Г.В. Солеустойчивость культурных растений. Л.: Колос, 1977. 216 с.

361. Удовенко Г.В. Физиологические механизмы адаптации растений к различным экстремальным воздействиям (условиям). М.: 1995. 247с.

362. Удовенко Г.В., Чудинова А.А. Влияние засоления среды на урожай и активность РНКазы и ДНКазы у растений разного уровня солеустойчивости // Физиология растений. 1986. Т.33. №6. С. 1166–1172

363. Умаров М.М. Ассоциативная азотфиксация. М.: МГУ, 1986. 136 с.
364. Умаров М.М. Значение несимбиотической азотофиксации в балансе азота в почве. // Изв. АН СССР. Сер. Биол. 1982. №1. С. 92–105.
365. Умаров М.М., Азиева Е.Е. Некоторые биохимические показатели загрязнения почв тяжелыми металлами / Тяжелые металлы в окружающей среде. М.: МГУ, 1980. С. 109–115.
366. Умаров М.М., Куракова Н.Г., Зуева Л.Д. Методы изучения азотофиксации и денитрификации в почве / Микроорганизмы как компонент биогеоценоза. М.: МГУ, 1984. С. 107–119.
367. Умаров М.М., Смолин В.Ю. Роль ассоциативной азотфиксации в балансе азота в почве и питании растений / Применение  $^{15}\text{N}$  в агрохимических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1985. С. 131–134.
368. Фатеев А.И. Трансформация и баланс азота удобрения в черноземе типичном при разбросном и локальном способах внесения // Агрохимия. 1992. №1. С. 12–16.
369. Федорова Е.Н., Черепнина С.С., Морозов А.С. Влияние различных уровней минерального питания на азотфиксирующую систему клевера красного // Тр. ВСХИЗО. М., 1983. 157с.
370. Федотов В.А., Столяров О.В., Демченко Н.И. Нут. Воронеж: ВГУ, 2004. 256 с.
371. Филимонов Д.А., Стрельникова Р.А. Баланс удобрения в кислых и известкованных дерново-подзолистых почвах / Применение  $^{15}\text{N}$  в агрохимических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1988. С. 35–36.
372. Филипчук О.Д., Соколов М.С., Павлова Т.В. Использование супрессивности почвы в защите растений от возбудителей корневых инфекций // Агрохимия. 1997. №8. С. 81–92.
373. Фокин А.Д., Черникова И.Л., Черняков Н.Е. Использование фосфора из растительных остатков и минеральных удобрений в некоторых севооборотах на дерново-подзолистых почвах // Изв. ТСХА. 1980. №3. С. 57–65.
374. Хазиев Ф.Х., Наумов Н.С. Почвенный азот и эффективность азотных удобрений. Уфа, 1979. 127 с.
375. Хайлова Г.Ф., Жизневская Г.Я. Симбиотическая азотфиксирующая система бобовых растений // Агрохимия. 1980. №12. С. 118–133.
376. Харкевич Л.П., Шаповал В.Ф., Анишина Ю.А. Урожай и качество зеленой массы люпина в зависимости от применяемой систем удобрения // Плодородие. 2011. №1. С. 7–9.
377. Хотяневич А.В., Веденева Н.А. Влияние 2, 4-Д на белки гороха // Физиол. Раст. 1965. Т. 12. №1. С. 58–63.
378. Хрюкин Н.Н., Дедов А.В., Несмеянова М.А. Влияние приемов биологизации на скорость разложения растительных остатков и продуктивность севооборотов // Плодородие. 2017. №4. С. 52–54.
379. Цивилева О.М., Никитина В.Е., Гарибова Л.В. Влияние состава среды культивирования на активность внеклеточных лектинов *Lentinus edodes* // Прикладная биохимия и микробиология. 2005. №2. С. 200–203.
380. Черников В.А., Соколов О.А. Оценка воздействия сельскохозяйственного производства на почвы. М.: РГАУ-МСХА, 2015. 120 с.
381. Черников В.А., Соколов О.А. Стратегия получения экологически безопасной продукции // Агроэкология. 2014. №1. С.13–18.

382. Черных Н.А., Милащенко Н.З., Ладонин В.Ф. Экологическая безопасность и устойчивое развитие / Экотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами. Пушино: ОНТИ, 2001. 148 с.

383. Черных Н.А., Овчаренко М.М. Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеоценозах. М.: Агроконсалт, 2002. 200 с.

384. Чернышев Е.П., Иванов Н.Б. Потери органических и минеральных веществ почвами юга Русской равнины при снеготаянии // Почвоведение. 1993. №2. С. 117–122.

385. Чернышева М.П., Аленкина С.А., Никитина В.Е., Игнатов В.В. Внеклеточные протеолитические ферменты штамма *Azospirillum brasilense* Sp7 и регулирование их активности гомологичным лектином // Прикладная биохимия и микробиология. 2005. №4. С. 444–448.

386. Чимитдоржиева Г.Д., Нимаева С.Ш. Мелиоративная роль растительных остатков рапса и ячменя в плодородии лугово-черноземных почв // Сиб. биол. журнал. 1991. В. 5. С. 53–58.

387. Шаббаев В.П., Смолин В.Ю. Отзывчивость озимой пшеницы на инокуляцию бактериями рода *Pseudomonas* на серой лесной почве // Почвоведение. 2000. №4. С. 497–504.

388. Шамсутдинов З.Ш., Писковацкий Ю.М., Новоселов М.Ю. Результаты и перспективы в селекции кормовых растений / Кормопроизводство: проблемы и пути решения. М.: Росинформагротех, 2007. С. 241–257.

389. Шаповал О.А., Можарова И.П., Мухина М.Т. Влияние регуляторов роста растений нового поколения на рост и продуктивность сои // Плодородие. 2015. №5. С. 32–34.

390. Шаповалов В.Ф., Плющиков В.Г., Курганов А.А. Влияние различных систем удобрения на продуктивность сераделлы на дерново-подзолистых песчаных почвах Брянской области // Вестник РУДН. Сер. Агробиология и животноводство. 2013. №3. С. 30–36.

391. Шатилов И.С., Вербицкая Н.М. Фотосинтетическая деятельность злаковых многолетних трав при сенокосном использовании // Изв. ТСХА. 1973. №3. С. 49–54.

392. Шатилов И.С., Замараев А.Г., Чаповская Г.В. Поглощение газообразного аммиака полевыми культурами из приземного слоя атмосферы // Вестник с.-х. науки. 1988. №1. С. 17–20.

393. Шевцова Л.П., Шьурова Н.А., Башинская О.С. Достоинство чины посевной и совершенствование технологии ее возделывания в степном засушливом Поволжье // Главный агроном. 2017. №10. С. 51–54.

394. Шевякова Н.И., Королевски П. К вопросу о механизмах ответных реакций на засоление различных по солеустойчивости сортов фасоли // Сельскохозяйственная биология. 1994. №1. С. 84–88.

395. Шейн Е.В., Милановский Е.Ю. Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение. 2003. №1. С. 53–61.

396. Шейджен А.Х., Онищенко Л.М., Исупова Ю.А. Влияние длительно-го применения удобрений на физико-химические и агрохимические свойства почвы, урожайность и качество сои // Плодородие. 2013. №1. С. 26–28.

397. Шильникова В.К. Влияние минеральных азотсодержащих соединений на клубеньковые бактерии в условиях симбиоза // Известия ТСХА. 1972. Вып. 2. С. 75–79.

398. *Ширшов В.Я., Пайкова И.В.* О накоплении азота однолетними бобовыми культурами // *Агрохимия*. 1969. №7. С. 47–51.
399. *Шишкин А.Ф.* Эффективность новых известковых удобрений. М.: ЦИНАО, 2002. 326 с.
400. *Шмырева Н.Я.* Использование азота удобрений озимой рожью при различных способах внесения азотных удобрений в условиях эрозионного ландшафта // *Агрохимия*. 2007. №10. С. 44–49.
401. *Шмырева Н.Я.* Использование растениями азота удобрений и его миграция в дерново-подзолистых почвах склонов Центрального Нечерноземья // Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.: ВИУА, 1996. 21 с.
402. *Шмырева Н.Я., Быстров А.В.* Использование азота удобрений кукурузой на дерново-подзолистой почве склона северной и южной экспозиций // *Агрохимия*. 2002. №3. С. 23–26.
403. *Шмырева Н.Я., Соколов О.А.* Управление потоками азота на разных элементах склона // *Плодородие*. 2009. №3. С. 6–9.
404. *Шмырева Н.Я., Соколов О.А., Завалин А.А.* Особенности ассимиляции микроорганизмами азота фитомассы многолетних трав в почве разной степени эродированности // *Доклады Россельхозакадемии*. 2014. №3. С. 35–38.
405. *Шмырева Н.Я., Соколов О.А., Завалин А.А., Литвинский А.А.* Баланс азота удобрений при выращивании различных сортов ячменя на склоне // *Плодородие*. 2014. №3. С. 9–12.
406. *Шмырева Н.Я., Соколов О.А., Цуриков Л.Н.* Участие азота многолетних трав в формировании органического вещества дерново-подзолистой почвы // *Плодородие*. 2012. №6. С. 25–27.
407. *Шмырева Н.Я., Соколов О.А., Цуриков Л.Н., Прохин Л.В.* Баланс азота удобрений при выращивании многолетних бобово-злаковых трав на склонах // *Плодородие*. 2011. №3. С. 13–15.
408. *Шмырева Н.Я., Хузин И.А., Феценко Н.С., Быстров А.В.* Использование азота удобрений ячменем на дерново-подзолистой почве склона северной и южной экспозиции // *Агрохимия*. 2004. №10. С. 27–32.
409. *Шмырева Н.Я., Цуриков Л.Н., Макаров Н.Б., Прохин Л.В., Масакова Л. И.* Оценка использования овсом азота удобрений в эрозионном ландшафте с помощью  $^{15}\text{N}$  // *Плодородие*. 2008. №4. С. 41–43.
410. *Шотт П.Р.* Суточная динамика азотфиксирующей активности однолетних агроценозов // *Сиб. вестн. с.х. науки*. 2003. №2. С. 81–84.
411. *Шрамко Н.В., Вихорева Г.В.* Рациональное использование паров и приемов биологизации в условиях Верхневолжья // *Земледелие*. 2015. №6. С. 23–25.
412. *Шрамко Н.В., Вихорева Г.В.* Роль биологизированных севооборотов на изменение содержания гумуса в дерново-подзолистых почвах Верхневолжья // *Земледелие*. 2016. №1. С. 14–16.
413. *Шумный В.К., Сметанин Н.И.* Полиморфизм по симбиотической азотофиксации у разных видов и родов бобовых культур. Биологическая фиксация азота. Новосибирск: Наука, 1991. С. 23–36.
414. *Щапова Л.Н.* Микробная сукцессия при трансформации органического вещества // *Почвоведение*. 2004. №8. С. 967–975.
415. *Щур А.В.* Экологические особенности эспарцета при выращивании на радиоактивно загрязненных территориях Беларуси // *Плодородие*. 2016. №1. С. 44–47.

416. Эседуллаев С.Т., Шмелева Н.В. Особенности аккумуляции азота многолетними бобовыми травами в чистых и смешанных посевах в Верховьях // Плодородие. 2016. №6. С. 16–18.
417. Явтушенко В.Е., Цуриков Л.Н., Шмырева Н.Я. Использование азота удобрений озимой рожью и его миграция в дерново-подзолистой почве склона // Агрохимия. 1995. №12. С. 49–56.
418. Явтушенко В.Е., Цуриков Л.Н., Шмырева Н.Я. Использование азота удобрений многолетним бобово-злаковым травостоем из профиля дерново-подзолистой почвы в эрозионном рельефе // Агрохимия. 2006. №1. С. 55–61.
419. Явтушенко В.Е., Цуриков Л.Н., Шмырева Н.Я. Использование многолетней бобово-злаковой травосмесью азота удобрений в зависимости от срока их внесения, рельефа и способов обработки почвы // Агрохимия. 2005. №1. С. 30–37.
420. Явтушенко В.Е., Шмырева Н.Я., Цуриков Л.Н. Баланс, трансформация и миграция азота удобрений в эрозионном агроландшафте Центрального Нечерноземья // Агрохимия. 2000. №12. С. 5–14.
421. Яговенко Л.А., Яговенко Г.М. Гумусное состояние почв в севооборотах с люпином // Плодородие. 2007. №5. С. 17–19.
422. Яговенко Л.Л., Такунов И.П., Яговенко Г.Л. Влияние люпина на свойства почвы при его запашке на сидерацию // Агрохимия. 2003. №6. С.71–80.
423. Ягодин Б.А., Демьянова Т.А., Гнетиева Л.Н. Оценка размеров использования азота атмосферы и минеральных удобрений горохом и кормовыми бобами (опыты с  $^{15}\text{N}$ ) / Экологические последствия применения агрохимикатов (удобрений). Пушино, 1982. С. 46–47.
424. Ягодина М.С., Веревкин Е.Л. Использование меченого азота  $^{15}\text{N}$  и ацетиленового метода в исследованиях симбиотической азотфиксации / Применение  $^{15}\text{N}$  в агрохимических исследованиях. Новосибирск, 1988. С. 153–155.
425. Ягодина М.С., Треначев Е.П. Азотфиксирующая способность и урожайность вики и викоовсяной смеси при различном фосфатном уровне почвы // Изв. АН СССР. Сер. Биол. 1989. №2. С. 52–56.
426. Adesemoye A.O., Torbert H. A., Kloepper J. M. Increased plant uptake of nitrogen from  $^{15}\text{N}$ -depleted using plant growth-promoting-rhizobacteria // Applied Soil Ecology. 2010. V. 46. P. 54–58.
427. Alves B.J.R., Boddey R.M., Urqiaga S. The success of BNP in soybean in Brazil // Plant. Soil 2003. №252. P. 1–9.
428. Ambus P., Jensen E.S. Nitrogen mineralization and denitrification as influenced by crop residue particle size // Plant and Soil. 1997. V. 197. №2. P. 261–270.
429. Andgers D.A. Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfalfa // Soil. Soc. Sec. Amer. J. 1992. V. 56. P. 1244–1249.
430. Andrews M., James E.K., Sprent Y.J. Nitrogen fixation in legumes and actinorhizal plants in natural ecosystems: Values obtained using  $^{15}\text{N}$  natural abundance // Plant Ecology Diversity. 2011. V. 4. №2-3. P. 131–140.
431. Athar M., Johnson D.A. Nodulation, biomass production and nitrogen fixation in alfalfa under drought // J. of Plant Nutrition. 1996. №19. P. 185–199.
432. Baldani J.I. pH requirements of *Azospirillum* spp. Third Inter. Symp of nitrogen fixation with nolegumes. Helsinki, 1985. 71p.

433. Berket M., Ladha J.K., Ottow J.C. Nitrogen losses and lowland rice yield as affected by residue N release // *Soil. Soc. Sec. Amer. J.* 1994. V. 58. P. 1660–1665.
434. Blackmer A.M., Green C.J. Modelling N mineralization of vegetable crop on nitrogen availability to corn following corn or soybean // *Soil. Soc. Sec. Amer. J.* 1995. V. 59. №4. P. 1065–1070.
435. Breland T.A. Modeling mineralization of plant residues in soil effect of physical protection // *Biol. Fertil. Soils.* 1997. V. 25. №3. P. 233–239.
436. Buitas C., Cheh E. Effect of heavy metallic and chelating agents on potassium uptake of cereal roots // *Plant and Soil.* 1981. V.63. №1. P. 97–100.
437. Chaboud A., Rougier M. Identification and localization of sugar components of rise root cap mucilage // *J. Plant Physiol.* 1984. V. 116. №34. P. 323–330.
438. Davis C., Linscott D.L. Tolerance of birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*) to 2,4-D // *Weed Sci.* 1985. V. 34. P. 373–375.
439. De Toch P., Vanderleyden J. Surface properties and mobility, of *Rizobium* and *Azospirillum* in relation to plant root attachment // *Microbiol. Ecol.* 1996. V. 32. №1. P. 149–169.
440. Dejoux J.F., Recous S., Meynard J.M. The fate nitrogen from winter-frozen rapeseed leaves: mineralization, fluxesto the environment and uptake by rapeseed crop in spring // *Plant and Soil.* 2005. №1-2. P. 258–272.
441. Denk T.R.A., Butterbach-Bahl K., Kiese R. The nitrogen cycle: a review of isotope effects and isotope modeling approaches // *Soil Biol. Biochem.* 2017. V. 376. №1. P. 121–137.
442. Bergstrom L.F., Kirchmann H. Leaching and crop uptake of nitrogen from nitrogen – 15 – labeled manures and ammonium nitrate // *J. Environ. Qual.* 2004. V. 33. P. 1786–1792.
443. Dijkstra F.A., Keitel C., He M. Plant and microbial uptake of nitrogen and phosphorus affected by drought using <sup>15</sup>N and <sup>32</sup>P tracers // *Soil Biol. Biochem.* 2015. V. 82. №1. P. 135–142.
444. Dixon R.O.D., Wheeler A.B. Nitrogen fixation in plants. New York. Blackie and Son. 1986. P. 133–143.
445. Dobereider J., Pedrosa F.O. Nitrogen-fixing bacteria in nonleguminous crop plants // Berlin. Heidelberg. 1987. 155 P.
446. Dufrene Y.E., Rouxhet P.C. Surface composition surface properties and adhesiveness of *Azospirillum brasilense*-variation during growth // *Canad J. Microbiol.* 1996. V. 42. №5, P. 548–556.
447. Fox R.H., Myers R.J., Vallis I. The nitrogen mineralization rate of legume residues in soil as influenced by their polyphenol, lignin, and nitrogen contents // *Plant and Soil.* 1990. V. 129. №2. P. 251–259.
448. Frankenberger W.T., Abdelmadid H.M. Kinetic parameters of nitrogen mineralization rates of leguminous crops incorporation into soil // *Plant and Soil.* 1985. V. 87. №2. P. 257–271.
449. Fustec J., Bernard F. Comparison of yields and biological nitrogen fixation of two legumes grown in different silt soils. Biodiversity and animal feed. Future challenges for grassland production // *Pros. 22 Gen. Meet of the Europ. Grassland Fed.* Uppsala. Sweden. 2008. P. 245–247.
450. Gaillard V., Chenu C., Recous S. Carbon mineralization in soil adjacent to plant residues of contrasting biochemical quality // *Soil. Biol. Biochem.* 2003. V. 35. №1. P. 93–99.

451. *Giller K.E.* Nitrogen fixation associated with the roots of sorghum and millet. Adv. in nitrogen fixation research Wageningen. PUDOC. 1984. P. 53–61.
452. *Green C.J., Blackmer A.M.* Residue decomposition effect on nitrogen availability to corn grown after corn or soybean // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1995. V. 59. P. 1065–1070.
453. *Gresshoff P.M., Ceatano-Anolles G.* Systemic regulation of nodulation in legumes. Plant Biotechnology development. London-Tokyo. CRC Press. 1992. P. 87–100.
454. *Grews T.E., Peoples M.B.* Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer – based agroecosystems // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2005. V. 72. P. 101–120.
455. *Haahtela K.* The role of root-associated *Klebsiella pneumoniae* the nitrogen nutrition of *Poa pratensis* and *Triticum aestivum* as estimated by the method of N isotope dilution. The Third Int. Symp. on nitrogen fixation with non-legumes. Helsinki. 1984. P. 40.
456. *Hadas A., Kautsky L., Goek M., Kara E.E.* Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover // *Soil. Biol. Biochem.* 2004. V. 36. №2. P. 225–266.
457. *Handayanto E., Giller K.E., Cadiseh G.* Regulation N release from legume tree prunings by mixing residues of different quality // *Soil. Biochem.* 1997. V. 29. №9-10. P. 1417–1426.
458. *Hardy R.W.F.* Application of the acetylene assay for measurement of nitrogen fixation // *Soil Biol. Biochem.* 1973. V. 5. P. 41–83.
459. *Harris G.H., Hesterman O.B., Paul E.A.* Fate of legume and fertilizer nitrogen-15 in a long – term cropping systems experiment // *Agron. J.*, 1994. V. 86. P. 910–915.
460. *Haynes R.J., Mokolobate M.S.* Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2001. V. 59. №1. P. 47–63.
461. *Hegazi N.A.* Response of maize plants to inoculation with azospirilla and (or) straw amendment in Egypt // *Canad. Journ of Microb.* 1983. V. 29. №8. P. 888–894.
462. *Heichel G.H., Henyum K.D.* Dinitrogen fixation, nitrogen transfer and productivity of forage legume-grass communities // *Crop Sci.* 1991. №31. P. 27–31.
463. *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. №8. P. 1135–1149.
464. *Herridge D.F., Peoples M.B., Boddey R.M.* Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems // *Plant and Soil.* 2008. №31. P. 1–18.
465. *Hopper W., Mahadevan A.* Degradation of cefthien by *Bradyrhizobium japonicum* // *Biodegradation.* 1997. V. 8. №3. P. 159–165.
466. *Inselsbacher E., Wanek W., Strauss J.* A novel <sup>15</sup>N tracer model reveals. Plant nitrate uptake governs nitrogen transformation rates in agricultural soil // *Soil Biol. Biochem.* 2013. V. 57. P. 301–310.
467. *Jans-Hammermeister D.C., Mc Gill W.B.* Evaluation of three simulation models used to describe plant residue decomposition in soil // *Ecol Modeling.* 1997. V. 104. №1. P. 1–13.

468. Janzen H.H., Bole J.B., Biederbeck V.O. Fate of N applied as green manure or ammonium fertilizer to soil subsequently cropped with spring wheat at three sites in western Canada // *J. Soil.Sci.* 1990. V. 70. P. 313–323.
469. Jensen E.S. Immobilization and mineralization during initial decomposition of  $^{15}\text{N}$ -labeled pea and barley residues // *Biol. Fert. Soils.* 1997. V. 24. №1. P. 39–44.
470. Jensen L.S., Mueller T., Magid J. Temporal variation of C and N mineralization microbial biomass and extractable organic pools in soil after oilseed rape straw incorporation in the field // *Soil Biol. Biochem.* 1997. V. 29. №7. P. 1043–1055.
471. Jensen L.S., Salo T., Palmason F. Influence of biochemical quality on C and N mineralization from a broad variety of plant materials in soils // *Plant and Soil.* 2005. V. 273. №1-2. P. 307–326.
472. Jensen E.S. Seasonal patterns of growth and nitrogen fixation in field-grown pea // *Plant and Soil.* 1987. V. 101. №1. P. 55–61.
473. Janselbacher E., Wanek W., Strauss J. A novel  $^{15}\text{N}$  tracer model reveals: Plant nitrate uptake governs nitrogen transformation rates in agricultural soils // *Soil Biol. Biochem.* 2013. V.57. P. 301–310.
474. Kannan S., Keppel H. Absorption and transport of Pb in young pea seedlings *Z. Naturforsch.* 1976. Bd. 31. H. 7-8. S. 393–396.
475. Kirka C. Temporal water stress effects on nodulation, nitrogen accumulation and growth of soybean // *Plant and Soil.* 1989. V. 120. №1. P. 49–55.
476. Kleinebecker T., Holz N., Prati D. Evidence from the real world:  $^{15}\text{N}$  natural abundances reveal enhanced nitrogen use at high plant diversity in Central European grassland // *J. Ecology.* 2014. V. 102. P. 456–465.
477. Korsath A., Henriksen T.M., Bakken L.R. Temporal changes in mineralization and immobilization of N during degradation of plant material: implication for the plant N supply and nitrogen losses // *Soil. Biol. Biochem.* 2002. V. 34. №6. P. 789–799.
478. Ladd J.N., Amato M. The fate of nitrogen from legume and fertilizer sources in soils successively cropped with wheat under field conditions // *Soil. Biol. Biochem.* 1986. V. 18. P. 417–425.
479. Ladd J.N., Oades J.M., Amato M. Microbial biomass formed from  $^{14}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ , labeled plant material decomposing in soils in the field // *Soil Biol. and Biochem.* 1981. V. 13. №1. P. 119–126.
480. Laidlaw A.S., Teuber N. Temperate forage grass-legume mixtures: advances and perspectives. Proc. XIX Intern. Grass-Land Congr. Sao Paulo 2001. P. 85–92.
481. Lane S.D., Martin E.S., Garrod J.F. Lead toxicity effect on indole – 3-acetic acid – induced cell elongation // *Planta.* 1978. V.144. №1. P. 79–84.
482. Ludquist E.J., Jackson L.E., Scow K.M., Hsu C. Changes in microbial biomass and community composition, and soil carbon and nitrogen pools after incorporation of rye into California agricultural soils // *Soil Biol. Biochem.* 1999. V. 31. №2. P. 221–236.
483. Michiels K.W., Verreth C., Vanderleyden Y. Azospirillum lipoferum and Azospirillum brasilense surface polysaccharides mutants that are affected in flocculation // *J. Appl. Bacteriol.* 1990. V.69. №6. P. 705–711.
484. Mishustin E.N., Emtsen V.T. Anaerobic nitrogen fixation and plant nutrition // 12-th Congr. ISSS. New Delhi. 1982. №1. P. 48–53.

485. *Moody S.F., Clarke A.F., Busik A.* Structural analysis of secreted slime from wheat and Cowpea roots // *Phytochemistry*. 1988. V. 27. №9. P. 2857–2861.
486. *Murek-Kozaczko K. M., Kopsinska Y., Lotocka B.* Infection of clover by plant growth promoting *Pseudo monas fluorescens* strain 267 and *Rizobium leguminosarum trifolii* studied by mTn5-gus A // *J Microbiol and Serol.* 2000. V. 78. №1. P. 1–11.
487. *Murphy D.V., Fillry J.R., Sparling G.P.* Seasonal fluctuation in gross N mineralization, ammonium consumption and microbial biomass in a Western Australian soil under different land uses // *Austr. J. Agric. Res.* 1998. V. 49. P. 523–535.
488. *Nicol G.W., Glover L.A., Prosser Y.J.* Spatial analysis of archaeal community structure in grassland soil // *Appl. Environ. Microbiol.* 2003. V. 69. №12. P. 7420–7429.
489. *Palm C.A., Gachengo C.N., Delve R.J.* Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database // *Agric. Ecosyst. Environ.* 2001. V. 83. №1-2. P. 27–42.
490. *Paul E.A.* Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems. Ed. by Wilson J.R. 1988. V. 1. 417 P.
491. *Peoples M.B., Baldock J.A.* Nitrogen dynamics of pastures: nitrogen fixation inputs the impact of legumes on soil nitrogen fertility, and the contributions of fixed nitrogen to Australian farming systems // *Aust. J. Exp. Agric.* 2001. V. 41. P. 327–346.
492. *Peoples M.B., Brockwell. Herridge D.F.* Biological nitrogen fixation by food legumes. Food legumes for nutritional security and sustainable agriculture // *Proc. 4-th. Inter. Food Legumes Research Conf. New Delhi.* 2008. P. 28–41.
493. *Postgate J.R.* New advances and future potential nitrogen fixation // *J. Appl. Bacteriol.* 1974. V. 37. P. 185–202.
494. *Praveen-Kumar., Jagadish C. Tarafdar., Jitendra Panwar., Shyam Kathju.* A rapid method for assessment of plant residue quality // *J. Plant Nutrition and Soil Sci.* 2003. V. 166. №5. P. 662–666.
495. *Rascher K.G., Hellmann C., Maguas C.* Community scale <sup>15</sup>N isoscapes: tracing the spatial impact of an exotic N<sub>2</sub>-fixing invader // *Ecology Plant.* 2012. V. 15. P. 484–491.
496. *Rowe E.C., Van Noordwijk M., Sapravogo D.* Root distributions partially explain <sup>15</sup>N uptake patterns in *Gliricidia* and *Peltophorum hedgeron* intercropping systems // *Plant Soil.* 2004. V. 235. P. 167–179.
497. *Russell M.P., Birr A.S.* Large-scale assessment of symbiotic dinitrogen fixation by crops: soybean and alfalfa in the Mississippi River basin // *Agron. J.* 2004. №96. P. 1754–1760.
498. *Sandorf J.O., Hairston J.E.* Effects of N on field growth and extraction of water wheat following soybeans and grain sorghum // *Agron. J. Agricult.*, 1984. V. 76. №4. P. 623–627.
499. *Sayerbeck D., Helaliv H., Nonnen S.* Consumption and turnover of photosynthates in the rhizosphere depending on plant species and growth conditions. 12 inddern // *Cong. ISSS. New Delhi.* 1982. №1. P. 239–249.
500. *Schulz R.R., Broschewitz B., Steinbach P.* Aktuelle Ergebnisse zum Anbau von Lupinen. *Raps.* 2000. V. 18. №1. P. 32–35.
501. *Shamoot S., Ms. Donald L., Bartholomew W.* Rhizodeposition of organic debris in soil. *Proc. Soil Sei. Soc. Amer.* 1968. №32. P. 817–825.

502. Sidhu A.S., Radhava H.S. Effect of a high level of magnesium on the absorption of zinc by wheat seedlings and its translocation in them. J. Res. Punjab Agr. Univ. 1979. V.16. №4. P. 467–469.

503. Sprent J.J., Gehlot K.S. Nodulated legumes in arid and semi-arid environments: are they important // Plant Ecology Diversity. 2011. V. 3. P. 211–219.

504. Thuries L., Pansu M., Feller C. Kinetics of added organic matter decomposition in a Mediterranean sandy soil // Soil. Biol. Biochem. 2001. V. 33. №7-8. P. 997–1010.

505. Tisdall J.M., Oades J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil // Journ of Soil Sci. 1982. V. 33. P. 141–163.

506. Trinsoutrot J., Recous S., Mary B. C and N fluxes of decomposing <sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N Brassica napus: effects of residue composition and N content // Soil. Biol. Biochem. 2000. V. 32. №11-12. P. 1717–1730.

507. Urquiaga S., Cadisch G., Alves B.J.R., Boddley R.M., Giller K.E. Influence of decomposition of roots of tropical forage species on the availability of soil nitrogen // Soil Biol. Biochem. 1998. V. 30. №14. P. 2099–2106.

508. Vasilyeva V., Kostov O. Effect of mineral and organic nitrogen on nodulation and production of lucerne under imposed drought conditions. Grassland Sci. Europe. 2001. V. 6. P. 23–26.

509. Venkaraman G.S. Non-symbiotic nitrogen fixation 12-th Int. Congr. Soil Sei. Rev. Soil Res. India. New Dehli. 1982. P. 205–235

510. Vinter K., Jensen O. Estimating legume N<sub>2</sub> fixation in grass-clover mixtures of a grazed organic cropping system using two <sup>15</sup>N methods // Agricult. Ecosystand Environ., 2000. V. 78. P. 139–147.

511. Whipps J.M. Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere // JExp. Bot. 2001. V. 52. P. 487–511.

512. Yoshida T. Microbiol roles in the nitrogen fertility of paddy soils Proc. Intern Semin. Soil Environ. Fertile // Manag. Intensive Agric. Tokyo. 1977. P. 764–768.

**А.А. ЗАВАЛИН  
О.А. СОКОЛОВ  
Н.Я. ШМЫРЕВА**

## **ЭКОЛОГИЯ АЗОТФИКСАЦИИ**

*Публикуется в авторской редакции*

Подписано к печати 02.10.2019.

Формат 70x100 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная.  
Уч.-изд. п. л. 20,48. Тираж 300. Заказ № 3116-19/07109.

Издатель – Российская академия наук.  
Издается по решению Научно-издательского совета  
Российской академии наук (НИСО РАН)  
и распространяется бесплатно  
Оригинал-макет подготовлен ООО «Амирит»

Отпечатано в типографии ООО «Амирит»,  
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 88.  
Тел.: 8-800-700-86-33 | (845-2) 24-86-33  
E-mail: [zakaz@amirit.ru](mailto:zakaz@amirit.ru)  
Сайт: [amirit.ru](http://amirit.ru)