



Российская Академия Наук

А.А. Алферов

**АССОЦИАТИВНЫЙ АЗОТ,
УРОЖАЙ И УСТОЙЧИВОСТЬ
АГРОЭКОСИСТЕМЫ**

Москва
2020

УДК 631.461.5:631.81:633.1
ББК 41.47 А53
А53

Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы / А.А. Алферов.
– М.: РАН, 2020. – 184 с.

ISBN 978-5-907036-87-1

DOI 10.25680/VNIIA.2019.21.92.152

В книге отражены результаты исследований по оценке эффективности инокуляции семян яровых зерновых культур (пшеница, ячмень) микробиологическими препаратами, которая определяется типом почв и уменьшается в ряду от черноземов до дерново-подзолистых почв. Установлены величины вовлечения ассоциативного азота, увеличения использования и окупаемости азота удобрений от применения биопрепаратов на различных типах почв. Автором на основе данных содержания гумуса и величины рН разработаны модели прогноза эффективности применения биопрепаратов ассоциативных diaзотрофов, которые позволяют определить величину урожайности зерна яровых зерновых культур (пшеницы и ячменя) на разных уровнях азотного питания на дерново-подзолистых почвах при варьировании метеорологических условий вегетационного периода.

С использованием стабильного изотопа ^{15}N выявлена роль источников азота в формировании урожая: увеличение накопления азота в урожае происходит за счет азота почвы, применяемого удобрения и фиксированного из атмосферы ассоциативными микроорганизмами. Определены параметры воздействия биопрепаратов ризосферных и эндوفитных микроорганизмов на интенсивность циклов азота (^{15}N минеральных и органических удобрений, почвенного азота) в агрофитоценозе яровой пшеницы. Установлено, что на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве агроэкосистема функционирует: в режиме гомеостаза (норма) при применении сидерата (биомасса горчицы белой (БМ), в режиме стресса (допустимый) при совместном использовании БМ и минерального азотного удобрения. При применении аммиачной селитры агроэкосистема менее устойчива, функционирует в режиме резистентности (предельно допустимый), в годы с повышенным увлажнением переходит в зону репрессии (недопустимый).

Монография адресована агрохимикам, агрономам, студентам и аспирантам учебных заведений сельскохозяйственного профиля, научным работникам и специалистам сельского хозяйства.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0572-2019-0013 и гранта РФФИ № 18-016-00200.

Рецензенты:

доктор биологических наук В.М. Семенов
доктор сельскохозяйственных наук, профессор В.И. Титова

ISBN 978-5-907036-87-1

© Алферов А.А., 2020
© ФГБНУ «ВНИИ агрохимии
им. Д.Н. Прянишникова», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Ассоциативная азотфиксация, ее роль в продуктивности сельскохозяйственных культур и трансформации азота.....	5
Глава 2. Методика проведения исследований.....	33
Глава 3. Оценка эффективности применения биопрепаратов на яровых пшенице и ячмене в европейской части России.....	41
Глава 4. Эффективность использования биопрепаратов и азотных удобрений на яровой пшенице и ячмене.....	61
Глава 5. Эффективность применения азотного удобрения, сидерата и биопрепарата Ризоагрин под яровую пшеницу.....	88
Глава 6. Эффективность применения биопрепаратов эндофитных микроорганизмов и азотного удобрения на яровой пшенице.....	110
Глава 7. Оценка применения биопрепаратов на основе <i>pseudomonas</i> sp. на яровой пшенице.....	118
Глава 8. Устойчивость агроэкосистемы, поток азота в системе удобрение – почва – растение.....	122
Заключение.....	150
Литература.....	152

Введение

В современных условиях развития сельского хозяйства России при широком использовании адаптивно-ландшафтных систем земледелия и в связи со снижением по сравнению с 1990 г. применения минеральных удобрений (с 83 до 57 кг/га) неизменно растет интерес к дополнительным источникам элементов питания растений, особенно азотного (Сычев, Шафран, 2012; Кудеяров, 2015; Кудеяров, Соколов, Глинушкин, 2017; Росстат, 2017). Недостаток азота минеральных удобрений и необходимость увеличения продуктивности сельскохозяйственных культур при стремлении снизить энергетические затраты на производство продукции растениеводства требуют комплексного применения минерального и биологического азота (Тихонович, Проворов, 2011).

В этой связи важное место занимают исследования использования биологического азота, поскольку до 70–90% азота в пахотных почвах фиксируется из атмосферного воздуха симбиотическими, ассоциативными и свободноживущими микроорганизмами (Тихонович, Завалин, 2016). При использовании ассоциативных diaзотрофов в зависимости от почвенно-климатических условий в агроценозы вовлекается от 30 до 60 кг/га азота воздуха (Воробейков и др., 2011). Кроме того, интродуцируемые микроорганизмы, применяемые для инокуляции семян сельскохозяйственных культур, стимулируют рост и развитие растений, повышают их устойчивость к биотическим и абиотическим факторам, в том числе ограничивают рост фитопатогенов, регулируют поступление загрязнителей из окружающей среды в продукцию сельскохозяйственного производства (Пищик и др., 2015; Тихонович, Завалин, 2016).

Результаты многолетних исследований микробиологов позволили создать ряд биопрепаратов на основе ассоциативных diaзотрофов, применение которых только на яровых зерновых культурах повышает урожайность зерна на 8–45% (Виноградова, 1999; Сиддики, 2001; Бердников, 2002; Волков, 2003; Завалин, Бердников, Алметов, 2004; Завалин, 2005; Сидакова, 2005; Литвинцева, 2008; Курсакова, Ступина, Драчев, 2010; Алметов, Горячкин, 2013). Ряд исследователей отмечают, что в условиях достаточного увлажнения действие ассоциативных биопрепаратов эквивалентно внесению азотного удобрения под озимые пшеницу, рожь и тритикале, ячмень и овес в дозе 30–45 кг/га, под яровую пшеницу – 30–55 кг/га (Виноградова, 1999; Шотт, 2007; Тихонович и др., 2011).

Вместе с тем не получило широкого распространения использование в сельскохозяйственном производстве биологических препаратов на основе diaзотрофов. Их применение в сельском хозяйстве остается на низком уровне. Причина, по-видимому, кроется в недостаточной изученности многих физиолого-биохимических и генетических особенностей процесса азотфиксации, недооценке практической значимости ассоциативной азотфиксации в регулировании плодородия почвы и устойчивости агроэкосистемы (Тихонович, 1989; Шабаев, 2004; Ilyas et al., 2010). Фактором, препятствующим широкому использованию в сельском хозяйстве «ассоциативных» бактери-

альных препаратов, следует считать и нерегулярную воспроизводимость результатов инокуляции, что не позволяет надежно прогнозировать реакцию растений (Умаров, Кураков, Степанов, 2007; Умаров, 2009; Skonieski et al., 2017).

Для увеличения объемов производства зерна необходима интенсификация технологий возделывания яровых зерновых культур, включающих научно обоснованное применение удобрений и биопрепаратов и предусматривающих изучение влияния комплекса агрохимических свойств почвы и погодных условий на эффективность биопрепаратов диазотрофов на фоне применения минеральных удобрений для получения планируемой урожайности яровых зерновых культур (Завалин, 2005).

Глава 1. Ассоциативная азотфиксация, ее роль в продуктивности сельскохозяйственных культур и трансформации азота

Проблеме азота в земледелии России посвящены научные работы Д.Н. Прянишникова (1931; 1952; 1976), Ф.В. Турчина (1972), Е.Н. Мишустина, В.К. Шильниковой (1968; 1973), П.М. Смирнова (1970; 1973), Г.П. Гамзикова (1981, 2013), Д.А. Коренькова (1976; 1999), Е.П. Трепачева (1999), О.А. Соколова (1985, 1990 (в соавторстве), 1992 (в соавторстве), 2015 (в соавторстве)), В.Н. Кудеярова (1986 (в соавторстве), 1989), А.А. Завалина (1995, 2003, 2016 (в соавторстве), 2019 (в соавторстве)). Она остается проблемой номер один и в XXI веке. По мнению В.Н. Кудеярова (2015), это обусловлено рядом обстоятельств. Во-первых, тем, что средняя величина урожаев определяется главным образом степенью обеспеченности растений азотом; во-вторых, большими выносами азота урожаями, потерями его из почвы вследствие вымывания, эрозии, улетучивания, слабым или почти полным отсутствием последействия азотных удобрений и, наконец, дефицитом и дороговизной минерального азота, потерями его при транспортировке.

Решение проблемы азота за счет только минеральных удобрений представляется невозможным. Анализируя работы Д.Н. Прянишникова, посвященные этой теме, необходимо отметить: он еще в середине XX века обращал внимание на то, что построение бездефицитного баланса в земледелии должно состоять в сочетании двух путей: 1) первоочередное обеспечение техническим азотом наиболее ценных культур и 2) недостающая потребность сельскохозяйственных культур должна быть покрыта «...за счет увеличения других источников прихода азота, главным образом азота биологического» (Прянишников, 1952, 1976).

Российская Федерация обладает разнообразными почвенно-климатическими условиями. В Едином государственном реестре почвенных ресурсов России (2014) насчитывается 205 почвенных разностей. А если к этому добавить еще и разные климатические условия, генотипы растений, уровни агротехнологий. Все это говорит о необходимости комплексного

подхода в изучении агрономических аспектов азотфиксации с адаптацией мероприятий по активизации процесса фиксации атмосферного азота к зональным технологиям возделывания полевых культур.

Основные запасы азота (75–80 %) сосредоточены в атмосфере (4-6•10¹⁵ тонн) в молекулярном виде и недоступны растениям. Несмотря на то что над каждым квадратным метром земной поверхности в воздухе содержится 7–8 тонн азота, потребности растений, произрастающих на этой площади, в элементе (10–20 г в год) не удовлетворяются, и они часто испытывают азотное голодание. Жизнь на Земле в значительной мере зависит от жизнедеятельности азотфиксирующих микроорганизмов, поскольку за счет симбиотической и несимбиотической фиксации в круговорот вовлекается наибольшая часть природного азота (Шотт, 2007). Масштаб биологической азотфиксации, происходящей на Земле, весьма внушительен. По данным В.В. Игнатова (1998), биологическая фиксация азота на земной суше составляет до 200 млн тонн в год, мировой океан дает до 120 млн тонн в год. Для сравнения: за счет всей химической промышленности в мире производится всего 84 млн тонн азотных удобрений.

В.Н. Кудеяров (1989) в своей работе «Цикл азота в почве и эффективность удобрений» на основании обобщения публикаций приводит другие данные поступления азота в результате биологической азотфиксации. В наземные экосистемы, по его мнению, ежегодно вовлекается около 150 млн тонн фиксированного азота, в том числе около 44 млн тонн – в мировые сельскохозяйственные угодья. М.М. Умаров (2009), оценивая вклад микроорганизмов в процесс азотфиксации, отмечает, что сельскохозяйственные растения получают 2/3 необходимого им азота из азотного резерва почв, созданного и поддерживаемого деятельностью микроорганизмов-дiazотрофов.

Вклад биологической азотфиксации в сельское хозяйство достаточно высок и по данным ФАО примерно вдвое превосходит вклад химических азотных удобрений, а в ежегодном потоке азота на земной суше почти в три раза больше, чем вклад азота минеральных удобрений (Завалин, 2005; Paul, 1988).

Изучению вопросов биологической фиксации атмосферного азота посвящены монографические работы Е.Н. Мишустина, В.К. Шильниковой (1968, 1973), В.Л. Кретовича (1983 (в соавторстве), 1987, 1994), О.А. Берестецкого (в соавторстве) (1984а, 1984б), М.М. Умарова (1986, 2001), С. Брэя (1986), Б.Ф. Садыкова (1989), В.К. Шумного, К.К. Сидоровой, И. Л. Клевенской (1991), Е.П. Трепачева (1999), А.А. Завалина (2005, 2007 (в соавторстве), 2009 (в соавторстве), 2014 (в соавторстве), В.П. Шабаева (2004), П.Р. Шотта (2007). В этих работах обобщен материал вместе с высоким уровнем экспериментальных исследований. И тем не менее необходимо отметить, что многие кардинальные вопросы по накоплению и использованию биологического азота в условиях широкого применения минеральных и органических удобрений в земледелии России недостаточно изучены и дискуссионны.

Способностью усваивать атмосферный азот обладают diaзотрофы – свободноживущие и симбиотические азотфиксирующие бактерии. В настоящее

время описано 2 рода археобактерий, 38 родов бактерий и 29 родов цианобактерий, обладающих азотфиксирующей активностью (Умаров, 2006; Умаров, Кураков, Степанов, 2007; Шотт, 2007). Все разнообразие бактерий – азотфиксаторов в агрономическом плане, по мнению Е.П. Трепачева (1999), можно разделить на три большие группы:

1. Клубеньковые (симбиотические) бактерии бобовых растений рода *Rhizobium*, инфицирующие корни бобовых с образованием на них клубеньков и живущих в симбиозе с высшим растением.

2. Несимбиотические (свободноживущие) бактерии, обитающие в почве (аэробные и анаэробные фиксаторы азота) и азотфиксаторы, обитающие на поверхности почвы – сине-зеленые водоросли, цианобактерии.

3. Ассоциативные азотфиксаторы рода *Azospirillum* и др., живущие главным образом за счет корневых выделений. К этой группе относятся различные виды и штаммы бактерий, выделенных из ризосферы и ризопланы растений.

Среди микроорганизмов, осуществляющих процесс азотфиксации, наиболее изучены бактерии рода *Rhizobium*, которые живут в симбиозе с бобовыми культурами, и ассоциативные азотфиксирующие бактерии родов *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Beijerinckia*, *Clostridium*, некоторые актиномицеты (род *Frankia*) и цианобактерии (Franche et al., 2009, Шапошников и др., 2011). Отличительной особенностью вышеперечисленных бактерий является наличие одинакового ферментного комплекса – нитрогеназы, который выступает катализатором процесса азотфиксации (Емцев, Мишустин, 2005).

Многие ученые в использовании биологической азотфиксации для нужд сельскохозяйственного производства на первом месте видят симбиоз клубеньковых бактерий рода *Rhizobium* с представителями семейства бобовых (Мишустин, Шильникова, 1973; Вавилов, Посыпанов, 1983; Трепачев, 1999). Однако, несмотря на высокую эффективность азотфиксации в симбиозах с бобовыми сельскохозяйственными растениями, в масштабах биосферы их вклад в общий баланс «биологического» азота сравнительно невелик, что обусловлено ограниченностью распространения таких сообществ – даже в агроэкосистемах доля бобовых культур не превышает 10% от общей площади посевов сельскохозяйственных культур, а в природных фитоценозах бобовые растения присутствуют лишь на первых этапах растительных сукцессий и их практически нет в климаксных экосистемах (Умаров, Кураков, Степанов, 2007). По данным Росстата, в 2016 году площади зернобобовых культур, включая сою, в России составили 5,0% от общей посевной площади, однолетние травы – 5,2%, а многолетние травы – 13,3% (Росстат, 2017). Принимая во внимание, что однолетние и многолетние травы содержат смеси злаковых и бобовых трав, то, следовательно, площади под бобовыми посевными культурами в пересчете на чистые посевы в 2016 году составили не более 14,3%.

В настоящее время активно исследуются свободноживущие фиксаторы атмосферного азота различных таксономических групп микроорганизмов и ассоциативные азотфиксаторы родов *Azospirillum* и др., существующие главным образом за счет корневых выделений и дающие возможность улучшить азотное питание небобовых растений. Тем более что в природе азот в наибольших масштабах фиксируется в ходе ассоциа-

тивной фиксации, при взаимодействии бактерий и растений, не образующих специализированных органов (клубеньков) на корнях и стеблях (Умаров, 1986; 2006; Фурина, Бонарцева, 2007).

Несимбиотическая азотфиксация осуществляется многочисленной популяцией гетеротрофных микроорганизмов, обитающих в почве и на поверхности растений. В научной литературе достаточно полно представлены результаты исследований по вопросам связывания атмосферного азота свободноживущими азотфиксаторами, главным образом родов *Azotobacter*, *Beijerinckia*, *Clostridium* и их роли в пополнении азотного фонда почвы (Мишустин, Шильникова, 1968; Мишустин, Емцев, 1974; Шильникова, Серова, 1983; Емцев, Чумаков, Брук, 1989; Kahindi, Giller et al., 1997; Шотт, 2007), а также зелеными водорослями, цианобактериями (Панкратова, 1980; Цыганков, 2007).

Разработка во второй половине XX века высокочувствительных и точных методов регистрации активности азотфиксации в почве, таких как изотопный и ацетиленовый, позволила установить новые группы микроорганизмов, обитающих в ризосфере растений и участвующих в этом процессе, а также дала возможность найти решение в управлении со стороны растения активностью ассоциации растение – азотфиксирующие бактерии (Giller et al., 1984; Емцев, Ницэ и др., 1989; Емцев, Чумаков, Брук, 1989). В целом же использование только одного ацетиленового метода в почвенно-микробиологических исследованиях позволило установить, что в природе существует около 12 тысяч растений различных семейств, способных к ассоциативной азотфиксации с почвенными микроорганизмами. Фиксация атмосферного азота обнаружена в ризосфере у представителей семейств мятликовых, крестоцветных, зонтичных, сложноцветных, пасленовых, гречишных, бурачниковых и других (Емцев, Ницэ, Годова, 1985; Васюк, 1989; Шабаев, 2004). Это открывает большие потенциальные возможности для применения ассоциативной азотфиксации в сельском хозяйстве. В настоящее время установлено, что нитрогеназная активность выявлена у более 50% бактерий, выделенных из ризосферы небобовых растений (Шабаев, 2004).

Важным достижением науки является обнаружение повышенной активности азотфиксации в фитоплане (ризосфере и филлосфере) небобовых растений (Умаров, 2006). По данным Б.Ф. Садыкова (1989) и М.М. Умарова (1986), способность к азотфиксации обнаружена у 55% бактерий, развивающихся в филлосфере различных растений. Среди сельскохозяйственных культур наиболее изучена ассоциативная фиксация азота в ризоплане сахарного тростника, пшеницы, ржи, ячменя, кукурузы, сорго, овсяницы луговой, ежи сборной, овощных культур (Умаров, 2006). Изучение сообществ микроорганизмов в разных зонах корневой системы злаковых растений показало, что наиболее высокий процент diaзотрофов наблюдается в зоне узла кушения и зоне проведения – ниже узла кушения (Берестецкий, Васюк, 1983; Васюк, 1989).

Ассоциативные азотфиксирующие бактерии широко распространены в почвах различных климатических зон, что дает возможность их широкого использования в сельском хозяйстве. К настоящему времени установлена высокая отзывчивость ряда сельскохозяйственных культур на обработку

их биопрепаратами азотфиксаторов (Васюк, 1989; Кожемяков, Белоброва, Орлова, 2011; Завалин, Алметов, Чернова, 2014). Наибольшей отзывчивостью на бактеризацию обладают злаковые растения (Кандаурова, 1997; Алметов, Бердников и др., 2001; Волков, 2003; Сологуб, 2005; Никитин, 2017). Положительное действие на рост и продуктивность растений установлено для многих штаммов бактерий, относящихся к разным систематическим группам, причем механизм этого действия не всегда известен (Van Veen et al., 1997; Bashan et al., 1998, 2004).

В качестве активных ассоциативных азотфиксаторов к настоящему времени выделено и описано свыше 46 родов микроорганизмов – диазотрофов, объединяющих 16 семейств, включая представителей разных таксономических групп хемотрофов и фототрофов, аэробов и анаэробов. Активные штаммы ассоциативных азотфиксаторов относятся к родам *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Beijerinckia*, *Clostridium*, *Corynebacterium*, *Derrxia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Klebsiella*, *Mycobacterium*, *Pseudomonas*, *Rhodospirillum*, *Serratia*, *Xantobacter* и др. (Берестецкий, 1986; Умаров, 1986; Редькина, 1989; Игнатов, 1998; Шабаев, 2004; Шотт, 2007; Злотников, Казакова и др., 2007; Умаров, 2009; Тихонович, Проворов, 2011; Фунг Тхи Ми, Манучарова и др., 2015; Wani, 1990; Kahindi et al., 1997; Holguin et al., 1999). Этот список ассоциативных азотфиксаторов не окончательный и непрерывно пополняется по мере изучения новых представителей микроорганизмов. Одновременно продолжают исследовать свойства вышеуказанных диазотрофов, их функционирования во взаимоотношениях с высшими растениями. К наиболее изученным необходимо отнести роды *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Beijerinckia*, *Clostridium* и *Pseudomonas* (Умаров, 2009; Тихонович, Проворов, 2011; Wani et al., 1990; Dobbelaere et al., 2001; Bashan et al., 2004; Franche et al., 2009).

Другой группой азотфиксаторов выступают эндофитные микроорганизмы. Эндофитными могут называться бактерии, которые способны колонизировать внутренние ткани растения, не оказывая отрицательного влияния на его развитие и не вызывая заболеваний (Чеботарь, Щербаков и др., 2016; Schulz et al., 2006; Bhattacharjee et al., 2008). К настоящему времени отечественными и зарубежными учеными накоплен достаточно обширный материал об эндофитных бактериях, ассоциированных с высшими сосудистыми растениями (Чеботарь, Щербаков и др., 2015; Щербаков, Заплаткин и др., 2013; Compant et al., 2011; Ryan et al., 2008). Установлено, что эндофитные микроорганизмы, существующие внутри растения, включая надземную, подземную части и семена, и благотворно влияющие на их развитие, используют внутреннюю среду растений (эндосферу) в качестве уникальной экологической ниши, защищающей их от изменений внешней среды (Щербаков, Брагина и др., 2013; Тихонович, Завалин, 2016; Zhu et al., 2018).

Эндофитные бактерии обычно колонизируют межклеточные пространства, могут быть выделены из растений относящихся как к классу однодольных, так и двудольных, начиная с древесных, таких как дуб (*Quercus L.*) и груша (*Pyrus L.*), до травянистых, таких как пшеница (*Triticum*

vulgare L.), картофель (*Solanum tuberosum*), сахарная свекла (*Beta vulgaris* L.), кукуруза (*Zea mays* L.), хлопчатник (*Gossypium herbaceum*), сахарный тростник (*Saccharum officinarum*) (Щербаков, Заплаткин и др., 2013; Чеботарь, Щербаков и др., 2015; Azevedo et al., 2000). При исследовании кукурузы (*Zea mays* L.), сорго (*Sorghum vulgare* Moench), сои (*Glycine max* (L.) Merr.), пшеницы (*Triticum vulgare* L.) и ряда дикорастущих растений (злаковые и бобовые травы) были изолированы 853 штамма бактериальных эндофитов, которые относились к 15 родам: *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Bradyrhizobium*, *Cellulomonas*, *Clavibacter*, *Corynebacterium*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Escherichia*, *Klebsiella*, *Microbacterium*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Rothia* и *Xanthomonas* (Чеботарь, Мальфанова и др., 2015; Iniguez et al., 2004). При этом некоторые эндофиты не являются узкоспециализированными, т.е. заселяющими определенные культурные растения. Так представители родов *Arthrobacter* и *Bacillus* не являются специфичными эндофитами для растений семейства злаковых, они выступают как космополиты, что позволяет их использовать в качестве основы биопрепаратов для многих сельскохозяйственных культур (Patel et al., 2017).

Исследователями отмечаются такие позитивные функции эндофитных групп бактерий, как способность переводить атмосферный азот в формы, доступные для усвоения, тем самым улучшать азотное питание и стимулировать рост растения-хозяина, усиления резистентности растения к действию фитопатогенов (Чеботарь, Щербаков и др., 2015; Barraquio et al., 1997; Rothballer et al., 2009). Другими важными способностями эндофитных микросимбионтов являются синтез фитогормонов, стимулирующих усиленный рост корневой системы растения и соответственно приводящий к улучшению минерального питания (Чеботарь, Щербаков и др., 2016; Triplett et al., 1996; Ruby et al., 2011). Использование бактериальных эндофитов открывает новые перспективы по поиску, выделению и характеристике прокариотических микроорганизмов с целью создания новых микробных препаратов для регулирования условий жизни, в том числе азотного питания растений (Ryan R.P. et al., 2008).

В отношении азотфиксации у эндофитных N₂-фиксаторов, обитающих в тканях или в проводящей системе растений, эффективность выше, чем у ризосферных, так как продукты нитрогеназной активности эндофитов не рассеиваются в окружающей среде. Наиболее изученные эндофиты – представители родов *Azospirillum*, *Azoarcus*, *Gluconacetobacter*, *Herbaspirillum*; их практическое значение определяется способностью к колонизации злаковых растений, включая рис и пшеницу (Döbereiner et al., 1993; Reinhold-Hurek, et al., 1997; Hurek et al., 2002; Silveira et al., 2016).

Важность деятельности diaзотрофов не ограничивается фиксацией молекулярного азота. Механизм действия бактерий на небобовые растения имеет комплексный характер. Ризосферные бактерии способны обеспечить для растений целый ряд полезных функций. В процессе жизнедеятельности они продуцируют биологически активные вещества, которые позволяют ускорить рост корневой системы и тем самым обеспечить растению успех в охвате необходимой площади питания, а также регулировать развитие растений, способствуют увеличению скорости поглощения воды

(Кожемяков, Хотянович, 1997; Кравченко, 2000; Jain et al., 1985; Dobbe-laere et al., 2001). Ассоциативные азотфиксаторы улучшают фосфорное питание растений, оказывают фитосанитарное действие, ограничивают (биоконтроль) рост фитопатогенов на корнях растений с помощью таких механизмов, как выделение антибиотических соединений, растворение гиф патогенных грибов, подавление стрессовых реакций у растений, стимулируют прорастание семян, увеличивают их всхожесть (Завалин, 2005; Тихонович, Кожемяков, Чеботарь и др., 2005; Тихонович, Завалин, Благовещенская и др., 2011; Умаров, 2006; 2009; Тихонович, Завалин, 2016; Azevedo et al., 2000; Барков, Ваулин и др., 2007). Ассоциативные диазотрофы положительно влияют на способность симбиотических азотфиксаторов. Так совместное использование препаратов, содержащих штаммы *Azospirillum* и *Rhizobium*, облегчает проникновение клубеньковых бактерий в корневые волоски бобовых (Фурина, Бонарцева, 2007; O'kon et al., 1995; Molla et al., 2001). Повышение устойчивости растений в стрессовых условиях (повышение урожайности в условиях низких положительных температур, засухи, засоления и загрязнения почвы тяжелыми металлами) и биоконтроль над патогенами некоторые исследователи считают более важными, чем азотфиксация, так как довольно часто повышение продуктивности растений не коррелирует с азотфиксирующей активностью микроорганизмов (Tamosiune et al., 2017).

Биологический азот имеет и важное экологическое значение, так как поступает в почву постепенно, в течение всей вегетации, что исключает избыточное его накопление и снижает опасность загрязнения растениеводческой продукции и окружающей среды (Лактионов, Кожемяков и др., 2013). Другим аспектом экологической составляющей азотфиксации является то, что «биологический азот», получаемый в результате микробной фиксации его из атмосферного воздуха, не может загрязнять окружающую среду (почвы, водоемы), поскольку для большинства азотфиксирующих систем характерно тесное сопряжение процессов азотфиксации и фотосинтеза, вследствие чего весь фиксированный азот немедленно поступает в метаболические пути и используется для биосинтеза азотсодержащих соединений (Ковальская, Лобакова и др., 2006).

Преимущество биологического азота не только в безвредности. Для его накопления требуются относительно небольшие затраты энергии на активацию азотфиксирующих микроорганизмов. При биологической фиксации источником энергии является, как правило, продукты фотосинтеза, фиксированный азот усваивается растениями практически полностью (Тихонович, Завалин, 2016).

Размеры ассоциативной фиксации азота

Понимание важности использования биологического азота в сельском хозяйстве невозможно без определения его объемов. Как уже отмечалось ранее, масштаб биологически фиксируемого азота в мире, по разным литературным источникам, существенно колеблется. По данным ФАО,

вклад биологической фиксации азота в сельскохозяйственное производство примерно вдвое превосходит химические азотные удобрения, а в ежегодном потоке азота на земной суше почти в 3 раза больше азота минеральных удобрений. По мнению И.А. Тихоновича и А.А. Завалина (2016), с учетом коэффициента использования азота удобрений (не более 50% для минеральных и около 15–30% для органических) сельскохозяйственные растения получают из этих источников 30–35 млн т азота в год, а ежегодный вынос его из почвы с продукцией сельского хозяйства составляет около 110 млн т. Следовательно, основная масса азота в урожае имеет иное происхождение: это азот биологический и азот минерализующегося органического вещества почвы, также преимущественно микробиологического происхождения.

По данным Н.И. Черепкова (1985), глобальная азотфиксация в водных системах достигает 190 млн тонн, на суше – 130 млн тонн азота (симбиотическая и несимбиотическая). По другим источникам общее количество биологически фиксируемого азота в масштабе планеты оценивается в 10^8 – 10^9 тонн в год. В наземные экосистемы ежегодно вовлекается оценочно 150–200 млн. тонн фиксированного азота, из которых примерно 90 млн тонн фиксируется свободноживущими азотфиксаторами (Брей, 1986; Кудеяров, 1989).

Приведенные данные говорят об общих размерах биологической фиксации азота, в том числе и такого ее вида, как ассоциативная. Вместе с тем наиболее интересными, с точки зрения исследователя, для сельскохозяйственного производства важны размеры фиксации атмосферного азота в конкретных почвенно-климатических условиях и на определенной площади (на 1 га).

По данным Е.П. Трепачева (1999), размеры фиксации атмосферного азота в зависимости от вида растения и климатической зоны колеблются в пределах 3–600 кг/га в год. П.Р. Шотт (2007) отмечал, что уровень симбиотической азотфиксации бобовыми культурами весьма высок и может достигать 500–600 кг/га в год. Накопление биологического азота зернобобовыми культурами в большинстве случаев не превышает 150–200 кг/га. Отдельные авторы отмечают, что размеры азотфиксации у однолетних зернобобовых (соя, фасоль, горох, нут, люпин) составляет от 50 до 200 кг/га (Симаров, Аронштам и др., 1990; Dakora et al., 1997). По другим данным, размеры азотфиксации могут достигать у сои до 300 кг/га (Keyser et al., 1992).

Столь высокая вариабельность показателей обусловлена неодинаковой эффективностью различных штаммов клубеньковых бактерий, видовыми особенностями опытных растений и различиями методов определения размеров азотфиксации (нитрогеназная активность, разностный метод, изотопный).

Ассоциативная азотфиксация протекает с той или иной скоростью практически во всех типах почв различных природно-климатических зон. Накопленные к настоящему времени экспериментальные данные позволяют достаточно полно составить общее представление о размерах азотфиксации в ризосфере небобовых растений в различных почвенно-климатических условиях (Шотт, 2007). Эти данные существенно разнятся.

В исследованиях второй половины XX века в основном оценивались количественные параметры несимбиотической азотфиксации, которые постоянно подвергались существенной переоценке. Так, по данным Е.Н. Мишустина и В.К. Шильниковой (1968), в 60-е года XX века считали, что в зоне умеренного климата за счет свободноживущих азотфиксирующих бактерий в почву за период вегетации поступает лишь 3–5 кг/га. Однако уже в 70-е года Е.Н. Мишустин и Н.И. Черепков (1979), используя метод баланса, показали, что на черноземах Украины за счет несимбиотической азотфиксации может поступать в почву 23–55 кг/га азота в год. В.Н. Кудеяров (1989) отмечал, что размеры несимбиотической азотфиксации под различными культурами (зерновые, конопля, хлопчатник) и на разных типах почв (дерново-подзолистые, серые лесные, черноземные почвы и сероземы) близки между собой и составляют 30–40 кг/га в год. По данным Т.А. Калининской и Ю.М. Миллера (1988), в пахотных и целинных почвах азотфиксирующие микроорганизмы связывают от 20 до 30 кг/га азота. В других исследованиях В.Н. Кудеяровым, С.А. Благодатским, А.А. Ларионовой (1990) по результатам 5-летнего опыта путем обогащения активной фазы органического вещества серой лесной почвы ^{15}N получены следующие данные: на фоне РК – 73 кг/га, и на фоне N_{120}PK – 107 кг/га. В стационарном опыте с 7-польным севооборотом на дерново-подзолистой почве с разными системами удобрений И.С. Шатилов, А.Г. Замараев, Г.В. Чаповская (1977) установили положительный баланс азота за счет возможной ассимиляции азота атмосферы свободноживущими микроорганизмами в размере 19–37 кг/га в год. М.М. Умаров (1986) для дерново-подзолистых почв при наличии активно вегетирующей растительности (ячмень, злаковые травы) определил параметры суммарной продуктивной ассоциативной и несимбиотической азотфиксации в 40–55 кг, а в парующей почве – 10–13 кг/га в год. В почве рисовых полей за счет несимбиотической фиксации атмосферного азота ежегодно накапливается до 60–70 кг азота на 1 га (Ягодина, Ягодин, Веревкин, 1979). Под яровой пшеницей за счет ассоциативной азотфиксации ежегодное поступление азота достигает 30 кг азота на 1 га (Bremer et al., 1995), по другим данным от 2 до 19 кг/га (Galal et al., 2000).

В условиях Западной Сибири, по данным П.Р. Шотта (2007), поступление атмосферного азота за счет несимбиотической азотфиксации в злаковые агроценозы колеблется в пределах 8–36 кг/га в год, в среднем составляет около 30 кг/га в год. Исследования И.Л. Клевенской и Н.М. Мозжерина (1988) показали, что в зависимости от типа почв в Сибири за вегетационный период фиксируется диазотрофами 2–27 кг/га. По другим данным, в условиях Сибири при ассоциативной азотфиксации бактериями диазотрофами, обитающими в прикорневой зоне небобовых растений, в почве под посевами зерновых, технических и кормовых культур может накапливаться до 40–70 кг/га азота за сезон (Гамзиков, Гамзикова, Широких, 2012).

По другим исследованиям, масштабы ассоциативной азотфиксации в зоне умеренного климата достигают 50–150 кг/га молекулярного азота за вегетационный период, в тропических широтах – от 170 до 600 кг/га молекулярного азота в год (Феоктистова, Марданова и др., 2016; Abeysingha et al., 2010).

Как видно из приведенных выше данных, размеры поступления в агроценоз атмосферного азота за счет ассоциативной азотфиксации значительно разнятся. При этом собственно использование культурными растениями данного источника азота также отличается. По данным исследований, проведенных на дерново-подзолистых почвах Европейской части России, сельскохозяйственные растения используют: яровая пшеница – 10,3 кг (Завалин, 2003), – 4,3 кг (Завалин, Кожемяков и др., 2001), 5,9–12,4 кг (Бердников, 2002), 37,4 кг/га (Кандаурова, 1997), 6,5–6,7 кг/га (Горячкин, 2013), ячмень – 11,1–22,7 (Тарасов, 2005), 8,7–19,2 (Безгодова, 2009).

Таким образом, поступление ассоциативного азота в конкретный агроценоз определяется видом возделываемой культуры и условиями ее выращивания, которые оказывают существенное влияние как на состав диазотрофов, так и на их азотфиксирующую активность.

Условия, влияющие на ассоциативную азотфиксацию

Ассоциативные диазотрофы, как и любые микроорганизмы, требуют для своей жизнедеятельности определенных условий внешней среды, и их активность зависит от того, насколько экологические факторы конкретного местообитания отвечают этим требованиям.

Фиксация молекулярного азота, осуществляемая ассоциативными микроорганизмами, – один из энергоемких биологических процессов, для которого необходимо соблюдение двух основных условий: постоянный приток энергии и источник электронов, необходимых для функционирования нитрогеназного комплекса (Брей, 1986; Завалин, 2005). При наличии растений уровень азотфиксации в почве значительно выше, чем в их отсутствие. Причина этого явления кроется в том, что корневые выделения и корневая опад растений являются энергетическим субстратом для ассоциативных бактерий-диазотрофов, и, кроме того, в ризоплане создаются благоприятные условия для поддержания высокой активности нитрогеназы (ключевого фермента биологической фиксации азота), поскольку корни растений быстро поглощают азотсодержащие метаболиты азотфиксаторов, а муцигель защищает нитрогеназу от избытка кислорода (Добровольская, 2002; Феоктистова, Марданова и др., 2016; Isobe et al, 2014). Изменения интенсивности фотосинтеза в течение онтогенеза растений являются причиной колебаний величины азотфиксации на протяжении вегетационного периода (Емцев, Покровский, Хрушкова, 1978; Садыков, 1989; Шабаев, 2004, 2011; Завалин, 2005; Тихонович, Кожемяков, Чеботарь и др., 2005; Шотт, 2007; Kirizii et al, 2007).

В системе растение – ассоциативные диазотрофы ведущая роль принадлежит растению, что обусловлено его генотипическими свойствами, обеспечивающими такие физиологические параметры, которые приводят к взаимодействию с микроорганизмами (Гамзикова, 1994; Завалин, 2005; Шабаев, 2011). R.J. Rennie (1980) эти свойства растений назвал *nis*-признаком. В.Т. Емцев (1990) определял *nis*-признак как сложную полигенную структуру, которую можно представить в виде многоступенчатого процесса образования и функционирования ассоциации растение – диазотроф (цитируется

по А.А. Завалину, 2005). Среди мятликовых зерновых культур наиболее интенсивно *nis*-признак проявляется у кукурузы и сорго, менее – у пшеницы, ячменя, овса, озимой ржи.

Действие растения на ассоциативную микробиологическую фиксацию азота заключается и в обеспеченности последних продуктами экзосмоса и корневого опада. До одной трети всего углерода фотосинтеза прижизненно выделяется растениями в почву в виде богатых энергией легкодоступных для микроорганизмов углеводов (Садыков, 1989). По данным М.М. Умарова, А.В. Куракова, А.Л. Степанова (2007), В.П. Шабаева (2004), внесение с растительным опадом таких углеводов, как глюкозы, сахарозы, крахмала и других легкодоступных углеродсодержащих соединений, значительно стимулирует азотфиксацию вне зависимости от свойств почв и говорит о том, что деятельность гетеротрофных азотфиксирующих бактерий в почвах лимитирована главным образом недостатком легкодоступного энергетического субстрата. Количество прижизненного легкодоступного для diaзотрофов органического опада и выделений растений, поступающих в прикорневую зону, по данным разных исследователей, значительно варьирует: от 10–20% (Умаров, 1986) до 30% (Шотт, 2007) всех продуктов фотосинтеза и зависит от вида культурного растения.

Другим важным фактором, определяющим эффективность ассоциативной азотфиксации, является поиск и применение в качестве основы биологических препаратов штаммов микроорганизмов, обладающих повышенной способностью к ассоциации с культурными растениями и интенсивной азотфиксацией (Jain et al., 1984; Завалин, 2005; Тихонович, Проворов, 2011). А.П. Кожемяков, А.В. Хотянович (1997) отмечают, что наибольшая эффективность на озимой и яровой пшенице, овсе и рисе получена от препарата Ризоагрин, на кукурузе и озимой ржи – от Флавобактерина, в посевах проса и гречихи – от Азоризина. По другим данным, Флавобактерин обеспечивает максимальную прибавку на озимой пшенице, картофеле и большинстве овощных культур, Мизорин эффективен для ячменя (Тихонович, Завалин, 2016). На картофеле, сахарной свекле, томатах и моркови использование Флавобактерина повышает урожайность на 20–30% (Завалин, 2005). Вместе с тем чистые культуры ассоциативных diaзотрофов не всегда позволяют получать воспроизводимые результаты, поэтому более широкое применение получают биологические препараты на основе смешанных культур бактерий, инокуляция которыми дает более стабильные результаты (Белимов, 1990; Смолин, 1996; Умаров, 2006; Умаров, Кураков, Степанов, 2007).

Активность деятельности ассоциативных diaзотрофов, как и всего процесса азотфиксации, определяется почвенно-климатическими условиями (Mazzola et al, 2004). Среди факторов окружающей среды следует отметить: влажность и гранулометрический состав почвы (Мишустин, 1972; Кунакова, 1998; Умаров, 2006; Шотт, 2007), содержание, качественный состав и распределение органического вещества по профилю почвы (Емцев, 1975; Садыков, 1989; Умаров, 2001, 2006; Fallik et al., 1988; Oik, 2006), погодные условия вегетации растений (Виноградова, 1999а; Бердников, 2002), температура почвы и воздуха, концентрация углекислоты в филосфере (Ягодина, Ягодин, Веревкин, 1979; Умаров, 1986; Пухальская, 1997; Puri et al., 1999),

наличие и содержание в почве подвижных соединений азота, фосфора и калия (Умаров, 1986; Бердников, 2002; Завалин, Бердников, Алметов, 2004; Завалин, 2005), реакция почвенной среды (Емцев, Покровский и др., 1978; Лекомцев, 2002; Пасынков, 2004; Завалин, Благовещенская и др., 2012). Другим не менее важным фактором является численность, состав и взаимодействие микробных сообществ в фитоплане (Звягинцев, 1985).

Среди факторов, определяющих активность ассоциативной азотфиксации, выделяется тип почвы, с которым связаны такие факторы, как влажность и температура почвы, содержание и качественный состав органического вещества, реакция почвенного раствора, концентрация углекислого газа (Умаров, 1986; Умаров, Кураков, Степанов, 2007; Завалин, 2005). По данным П.Р. Шотта (2007), уровень активности фиксирования атмосферного азота диазотрофами снижается в ряду черноземы – серые лесные – дерново-подзолистые почвы, что обусловлено структурой микробиоценоза (2–4 вида диазотрофов в подзолистых почвах, около 15 – в серых лесных и 21–26 – в черноземах). В.Т. Емцев (1975) отмечал, что микробиологическая активность почв возрастает с севера на юг, от тундрово-глеевых почв к черноземам, с усложнением и совершенствованием сообществ диазотрофов. В других исследованиях закономерное нарастание активности азотфиксации наблюдается в ряду почв: подзолы, подзолистые, дерново-сильноподзолистые, дерново-слабоподзолистые, дерново-глеевые, серые лесные, черноземы, и наблюдается некоторое снижение активности от черноземов южных к каштановым почвам (Сиддики, 2001).

Ф.М. Минибаев (1990) отмечает, что азотфиксирующая активность различается в пределах одного типа почв – более высокая у типичных черноземов, меньше – у выщелоченного чернозема. Различия характерны и для профиля разных почв: у черноземов – максимальная азотфиксирующая активность наблюдается в слое 0–50 см, а у серых лесных почв – в слое 0–20 см.

Органические вещества, образующиеся при разложении растительных остатков, также в значительной мере регулируют состав и численность почвенной микрофлоры, в том числе диазотрофов (Умаров, 1983, Шотт, 2007). Активизация азотфиксации происходит и при внесении в почву соломы и других растительных остатков (Клевенская, 1974; Берестецкий, Макарова, Кравченко, 1984; Шумный, Сидорова, Клевенская, 1991; Сологуб, 2005; Лобкова, Бобкова, 2015). Установлена зависимость азотфиксирующей активности от соотношения углерода и азота в растительных остатках, поступающих в почву (Клевенская, 1974; Берестецкий, Возняковская, Доросинский, 1984).

Другим не менее важным фактором в жизни ассоциативных диазотрофов является влажность почвы, которая, по мнению М.М. Умарова (1986; 2009), лишь косвенно характеризует физиологическую доступность ее для живых организмов, но оказывает существенное влияние на некоторые показатели жизнедеятельности микроорганизмов (прорастание спор, интенсивность дыхания бактерий) – отмечается четкая зависимость. По мере увеличения влажности почвы интенсивность связывания атмосферного азота диазотрофами возрастает, при полной полевой влагоемкости – снижается (Садыков, 1989). Водный режим может быть одним из главных факторов

улучшения роста инокулированных растений. Инокулированные корни отличаются большей пропорцией молодых корней, чем неинокулированные (Михайловская, 2015).

Важную роль во взаимоотношениях азотфиксирующих бактерий с сельскохозяйственными растениями играет температурный фактор. Сопоставление значений ассоциативной азотфиксации с изменениями температуры почвы в верхнем горизонте (0–10 см) в течение вегетации корреляции между этими величинами не установлено (Умаров, 1986; Умаров, Кураков, Степанов, 2007). Исследователи отмечают большую зависимость ассоциативной азотфиксации в филлосфере от изменений температуры воздуха. Значительное замедление азотфиксации отмечается при температуре воздуха ниже 20°C и выше 34°C (Клевенская, 1976; Садыков, 1989; Шотт, 2007; Baldani et al., 1992).

Реакция почвенной среды. Существенное влияние на процесс ассоциативной азотфиксации оказывает реакция почвенной среды. Потенциальная активность азотфиксации выше на известкованных почвах (Козлова, Горленко и др., 2008). Границы реакции почвенного раствора (рНКСL), в которых развиваются ассоциативные диазотрофы, довольно широки. Вместе с тем исследователи отмечают, что наиболее благоприятной для фиксации атмосферного азота является нейтральная или слабокислая реакция почвенной среды – 5,8–7,0 (Мишустин, Шильникова, 1968; Шабаев, 2004).

Среди факторов, оказывающих существенное влияние на процесс азотфиксации, важное место принадлежит обеспеченности растений минеральным азотом. По мнению П.Р. Шотта (2007), как растения, так и микроорганизмы легко усваивают минеральный азот и с повышением его концентрации в среде активность ассоциативной азотфиксации, как правило, снижается. В этом вопросе существенное значение отводится не только применению минерального азотного удобрения, но и его дозе. Распространено мнение, что минеральный азот тормозит процесс ассоциативной азотфиксации (Умаров, 1986). По мнению других ученых (Мишустин, 1975, 1983; Волкогон, 1997; Шабаев, 2004; Galal et al., 2001), только высокие дозы азотных удобрений (100–150 кг/га) могут кратковременно подавлять ассоциативную азотфиксацию. В.Н. Кудеяров (1989) отмечает, что на фоне применения «стартовых» доз азотных удобрений азотфиксация на 30–45% выше, чем без них. По другим данным, внесение минерального азота в дозах, не превышающих физиологическую потребность растений, усиливает азотфиксацию и участие биологического азота в питании растений (Волкогон, 1987; Шотт, 2007; Galal et al., 2001). Вместе с тем дозы, не превышающие физиологическую потребность растений, существенно разнятся в зависимости от сельскохозяйственной культуры от 30 до 80 кг/га (Волкогон, 1987; Завалин, 2005; Шотт, 2007; Galal et al., 2001).

Продуктивность сельскохозяйственных культур и трансформация азота при применении удобрений и биопрепаратов ассоциативных diaзотрофов

Научно-обоснованное применение удобрений является неотъемлемой основой, обеспечивающей высокую урожайность и качество продукции сельскохозяйственных культур при своевременном и качественном выполнении других агротехнических приемов. Необходимой предпосылкой этого является изучение закономерностей действия удобрений на величину и качество урожая, баланс органического вещества и элементов минерального питания; оптимизация применения удобрений в зависимости от почвенных, климатических условий, вида удобрений, структуры севооборотов (Никитин, 2017).

По мнению Д.Н. Прянишникова (1952), задачей агрохимии как науки является изучение круговорота веществ в земледелии и выявление тех мер воздействия на химические процессы, протекающие в почве и растении, которые могут повышать урожай или изменять его состав. Главным способом вмешательства в этот круговорот является применение удобрений.

Целью возделывания растений является производство органического вещества, причем это вещество создается растением за счет минеральных соединений, главным образом из углекислоты и воды, при участии энергии солнечного луча. Основным процессом, приводящим к образованию безазотистых веществ (крахмала и других углеводов), является восстановление углекислоты, идущее с выделением кислорода (Прянишников, 1952). Данный процесс многогранно и детально изучен исследователями. Полученные при фотосинтезе органические вещества являются строительным материалом для построения растения как целостного организма. Д.Н. Прянишников (1952) роль безазотистых веществ в растении сравнивал лишь с топливом на заводе (крахмал и жиры) или со строительным материалом (клетчатка), ибо главной составной частью протоплазмы и ядра клетки являются белки и их производные, для построения которых, кроме углерода, кислорода и водорода, нужны азот, сера, фосфор, а для правильного функционирования всего механизма нужны еще некоторые зольные элементы (калий, кальций, магний, железо).

Азот – важнейший питательный элемент всех растений. Количество азота в составе сухого вещества растений невелико – 1–3%. Он входит в состав таких важных органических веществ, как белки, нуклеиновые кислоты, нуклеопротеиды, хлорофилл, алкалоиды и др. В среднем содержание его в белках составляет 16–18% (Кретович, 1987). Среди 3-х элементов питания растений азот занимает особое место, так как он оказывает наибольшее влияние на рост урожайности и повышение качества растениеводческой продукции. Не случайно в мировом производстве минеральных удобрений азотные занимают 1-е место среди макроэлементов: им принадлежит ведущая роль в повышении урожайности (Шафран, Духанина, 2017). Недостаток азота требует постоянного применения удобрений, эффективность которых зависит от почвенно-климатических условий регионов России (Кореньков,

1999; Гамзиков, 2013; Проблемы экспериментальной агрохимии..., 2013). По мнению С.А. Шафрана (2016), долевое участие азотных удобрений в формировании прибавки урожайности яровой пшеницы в зависимости от зоны составляет: в южнотаежно-лесной—43%, лесостепной—47% и в степной—26%. Необходимо отметить, что отзывчивость сельскохозяйственных растений на применение фосфорных и калийных удобрений определяется в первую очередь обеспеченностью почв их подвижными формами, то есть окультуренностью почвы, а также типом почв (Кулаковская, 1984, 1990; Соколов, Семенов, Агаев, 1990; Андрианов, 2004; Державин, 2007а; 2007б; 2010; Шафран, Прошкин, Духанина, 2012). При повышении окультуренности почв эффективность фосфорных и калийных удобрений падает, вклад их в формирование урожайности сельскохозяйственных культур уменьшается (Стребков, 1989; Пасынков, 2004; Шафран, 2015). Эффективность азотных удобрений находится в определенной зависимости от обеспеченности почв минеральными формами азота (аммонийными и нитратными). Прослеживается закономерность: чем больше его содержание в почве, что связано с окультуренностью почв, тем меньше прибавка урожая от применения азотных удобрений (Кореньков, 1976, 1999; Гамзиков, 2013; Шафран, 1995б; Шафран, Прошкин, 2008; Шафран, Прошкин и др., 2010). Данная закономерность отмечается для разных почвенно-климатических условий (Чуб, 1989; Подколзин, 2008; Гамзиков, 2013).

Биологические особенности сельскохозяйственных культур оказывают влияние на использование азота удобрений и их эффективность. По мнению Е.В. Руделева (1992), биологические особенности сельскохозяйственных культур обуславливают разную степень использования азота удобрений: культуры с замедленным начальным периодом развития (пример лен) значительно уступают в этом отношении культурам, активно потребляющим питательные вещества из почвы с момента начала их вегетации. К таковым относятся травы и зерновые культуры.

Изучению вопроса использования растениями азота удобрений и почвы посвящено много исследований и накоплен большой экспериментальный материал. Одним из первых коэффициент использования азота удобрений получил в конце 50-х годов Ф.В. Турчин. Он показал, что коэффициент использования азота удобрений растениями составлял 28–72% от внесенной дозы азота (Турчин, 1972; Кудеяров, 1989). По данным П.М. Смирнова (1977), коэффициент использования азота удобрений в 12 вегетационных опытах составлял 49–74%, а в 11 полевых – 30–47%. На дерново-подзолистых, подзолистых, серых лесных почвах разного гранулометрического состава установлено, что зерновые культуры (пшеница, ячмень, овес, кукуруза на зеленый корм) используют от 22 до 81% азота удобрений (Замятина, Кореньков, Варюшкина и др., 1963; Замятина, Варюшкина, Зерцалов, 1965; Андреева, Щеглова, 1964, 1966; Смирнов, 1970, 1977; Турчин, 1972; Кореньков, 1976, 1999; Руделев, 1992; Лаврова, 1992; Кидин, 1993; Семенов, 1996; Серегин, 2000; Будажапов, 2009; Lindberg et al., 1989; Matzel et al., 1990; Glendining et al., 2001; Завалин, Соколов, 2016).

Вместе с тем точность определения использования азота удобрений растениями обуславливается выбранным методом исследования. Примене-

ние в экспериментах разностного метода (по разности с контролем) дает завышенные значения коэффициента использования азота сельскохозяйственными культурами. Причина находится в природе процессов, происходящих в системе почва-растение при внесении азотных удобрений. Внесение азотных удобрений в значительной степени изменяет сбалансированный ход процессов минерализации-иммобилизации, способствуя активизации процесса минерализации органического вещества почвы за счет непосредственного включения свеживнесенного азота удобрений в общий цикл превращений азота. Исследованиями установлен более высокий вынос азота с урожаем растений, удобренных азотом, по сравнению с растениями на не-удобренных вариантах (Смирнов, 1970; Кореньков, 1976, 1999; Гамзиков, 1981; Соколов, 1985; Завалин, 1991; Руделев, 1992; Кидин, 1993). Явление дополнительного накопления азота почвы в удобренных растениях, которое было зафиксировано в многочисленных вегетационных и микрополевых опытах, получило название «экстра»-азота (Кореньков, 1999). Поэтому с использованием разностного метода определяется не только азот удобрений, но и «экстра»-азот почвы.

А.А. Завалин и О.А. Соколов (2016), оценивая влияние факторов на размеры потребления азота удобрений, на основании исследований, проведенных с применением азотных удобрений, меченных ^{15}N , отметили, что возделываемые сельскохозяйственные культуры способны использовать от 16 до 81% азота удобрений в зависимости от применяемой дозы (табл. 1.1).

Таблица 1.1
Использование азота минерального удобрения полевыми культурами
(Завалин, Соколов, 2016)

Культура	Азот удобрения, % от внесенного
Гречиха	50–63
Капуста белокочанная	52–58
Картофель	34–48
Клевер	42–46
Кормовые бобы	53–57
Кормовая свекла	25–71
Кострец безостый	53–72
Кукуруза (зеленая масса)	33–50
Лен	26–36
Люпин	43–49
Лук	25–46
Многолетние травы (злаковые)	38–57
Многолетние травы (бобово-злаковые)	21–35
Морковь столовая	18–26
Овес	38–49
Овсяница луговая	28–81
Озимая пшеница	31–50
Озимая рожь	29–52
Просо	52–53
Райграс	27–35
Рапс	45–72
Рис	16–29

Свекла сахарная	31–51
Свекла столовая	33–47
Тимофеевка луговая	36–66
Яровая пшеница	31–42
Ячмень	34–45

Применение в исследованиях изотопа ^{15}N позволяет четко проследить за судьбой каждой из форм азота в системе удобрение – почва – растение в разных условиях эксперимента. Данный метод позволил установить, что величина использования азота удобрений изменяется в широких пределах и определяется биологическими особенностями возделываемых растений (Кореньков, 1976; Муравин, 1991; Лаврова, 1992; Руделев, 1992; Кудеяров, 1989), также зависит и от ряда сопутствующих факторов: форм, доз, сроков и способов внесения удобрений (Андреева, Щеглова, 1966; Кореньков, Романюк и др., 1975; Кореньков, 1976, 1999; Гамзиков, 1981; Кудеяров, 1989; Семенов, 1996), почвенной разности и плодородия почвы (Варюшкина, 1982; Помазкина, 1985; Иванова, 1988; Дмитриев, 1990; Завалин, 1991; Руделев, 1992; Кидин, 1993; Шафран, 1995; Пигарева, 2007), азотного фонда, количества и вида (соотношение C:N) оставляемых растительных остатков предшественников (Смирнов, 1977; Кудеяров, Биелек, Соколов и др., 1986; Муравин, 1991; Будажапов, 2009; Гамзиков, 1981, 2013; Семенов, Когут, 2015; Завалин, Соколов, 2016) и других факторов. Среди факторов существенное влияние на усвоение азота удобрений оказывают условия увлажнения: недостаток влаги приводит к резкому снижению коэффициента использования (Гамзиков, 1981, 2013).

На использование азота удобрений и почвы существенное влияние оказывает генетика сельскохозяйственных культур (видовая спецификация культуры, физиологические особенности, сорт), что обусловлено генетическим контролем за поступлением, ассимиляцией и метаболизмом азота растений (Павлов, 1984; Гамзикова, 1994, 2008; Жученко, 1994; 2008; Шпаар, Элмер и др., 2000; Сандухадзе, 2010; Гамзиков, 2013; Завалин, Соколов, 2018). Это можно проследить на зерновых культурах. По данным Г.П. Гамзиковой (2013), на дерново-подзолистых почвах яровая пшеница уступает ячменю и овсу как по общему выносу азота, так и использованию его из удобрений. На этих почвах под разными культурами при внесении одной и той же дозы (500 мг азота на сосуд) аммиачной селитры наблюдается неодинаковое использование почвенного азота. Максимальное количество «экстра»-азота извлекается ячменем. Не только генетические, но и сортовые особенности растений влияют на потребление азота почвы и удобрений. Так современные сорта озимой и яровой пшениц по сравнению со «стародавними» намного эффективнее используют почвенный азот для увеличения урожайности и формирования высокого качества зерна и муки как при низких, так и при высоких дозах азота (Журавлева, 2011, 2012; Хлесткина, Журавлева и др., 2017). Это обусловлено направлением современной селекции пшеницы на эффективное использование поглощенного азота на ростовые процессы, что сопровождается ростом содержания азота в зерне и изменением структуры растения ($K_{\text{хоз}}$) в пользу зерновой продуктивности (Гамзикова, 1994, 2008).

В вопросе эффективности удобрений важное место занимает тип почв. Это обусловлено тем, что в отсутствии поступления минерального азота с удобрениями основным его источником является почва (Кореньков, 1976, 1999; Смирнов, 1973, 1977; Гамзиков, 1981, 2013; Осипов, Соколов, 2001; Сычев, Соколов и др., 2012). Большая часть почвенного азота представлена трудногидролизруемыми органическими соединениями и не может непосредственно использоваться растениями. Только около 15% от общего содержания органического азота в почве в результате биологических процессов минерализуется, превращаясь в водорастворимые формы азота, которые могут использоваться растениями. Как отмечалось ранее, в почве идут постоянно процессы минерализации и иммобилизации органического вещества. Процесс минерализации органического вещества превалирует над иммобилизацией, поэтому в почве постоянно присутствует определенный запас минерального азота (Кореньков, 1999). В разных типах почв минерализуется не одинаковое количество азота. В дерново-подзолистых почвах образуется примерно 30–35 кг/га минерального азота, в черноземах – 50 кг/га (Смирнов, 1977).

Почвы, которые от природы отличаются низким естественным плодородием, обладают сравнительно небольшим количеством легкодоступных элементов питания. В Нечерноземной зоне Российской Федерации такими являются дерново-подзолистые почвы разного гранулометрического состава (Тюрин, 1965; Кононова, 1972; Тюлин, 1973; Кулаковская, 1984; Ганжара, 1988; Цыбулько, Черныш и др., 2013). По данным Т.И. Ивановой (1999), на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве даже со средней обеспеченностью фосфором и калием главная роль в формировании урожая зерновых культур принадлежит азоту и азотным удобрениям.

Исследованиями установлено, что действие азотных удобрений на продуктивность культурных растений наиболее сильно и устойчиво проявляется на дерново-подзолистых почвах в условиях достаточного обеспечения растений влагой (Прянишников, 1952, 1976; Кулаковская, 1984, 1990; Кретович, 1987; Турчин, 1972; Смирнов, 1970; Смирнов, Дегтярева, 1973; Смирнов, Кидин, Ионова, 1980; Мосолов, 1979; Кореньков, Руделев, Филимонов, 1980; Кореньков, Синягин, Петербургский, 1982; Кореньков, 1976, 1985, 1999; Кудеяров, Биелек, Соколов и др., 1986; Кудеяров, 1989; Удобрения, их свойства..., 1982; Руделев, 1992; Завалин, 1991; Соколов, Семенов, 1992; Кидин, 1993, 2008; Семенов, 1996; Иванова, 1989; Саранин, Каничев, 2000; Сычев, 2000; Сычев, Соколов, Шмырева, 2009; Сычев, Ефремов, 2011; Гамзиков, 2013; Завалин, Соколов, 2016; Шафран, Духанина, 2017). При этом оптимальный фосфатный уровень в почве значительно повышает эффективность азотных и калийных удобрений. Удовлетворение потребности зерновых культур в фосфоре и калии повышает способность их противостоять экстремальным метеорологическим условиям, неблагоприятным фитосанитарным условиям, повышает не только урожайность культур, но и улучшает качество зерна (Державин, 2007б; Пасынков, 2004). Вместе с тем положительное действие фосфорных удобрений на качество зерна проявляется только в случае высокого содержания минерального азота в почве и низком – подвижных фосфатов (Панников, Минеев, 1987).

Необходимо отметить, что, как правило, исследования с азотными удобрениями проводятся на одной почвенной разности. Это делает трудным оценку влияния типа почв и его плодородия на эффективность удобрений. В этом плане заслуживает внимания исследование Е.В. Руделева (1992) на четырех почвах Московской области (дерново-подзолистая песчаная, дерново-подзолистая тяжелосуглинистая, дерново-луговая и торфянистая). С ростом естественного плодородия почв увеличивается содержание элементов питания и органического вещества. При этом в общем выносе азота растениями на почвах с низким естественным плодородием (дерново-подзолистые песчаные и суглинистые) доля азота удобрения составляла 41,6–58,4%. Повышение уровня естественного плодородия способствует снижению доли азота удобрения в общем выносе – до 39,1% на дерново-луговой и до 18,9% на торфянистой почвах, а доля азота почвы возрастает с 51,6–48,4% соответственно до 60,9 и 81,1%. То есть уровень естественного плодородия почвы в определенной степени обуславливает различное соотношение азота удобрений и почвы в общем выносе его с урожаем, однако не влияет на использование азота удобрений растениями (Руделев, 1992).

Существенное влияние на эффективность азотных удобрений в посевах зерновых культур оказывают климатические условия. Засушливые погодные условия вегетации обычно способствуют получению сравнительно низких прибавок урожайности зерна. При этом в большей мере происходит улучшение качества зерна (выше белковость зерна, лучше качество клейковины) (Павлов, 1967, 1984; Конарев, 1980; Кореньков, 1985; Завалин, 2003; Клейменова, 2007; Пасынкова, 2013; Никитин, 2017). В этих условиях повышенное содержание белка в зерне происходит не в результате усиления его синтеза, а вследствие торможения отложения крахмала в эндосперме зерна, что увеличивает относительное содержание белка в зерне (Завалин, Соколов, 2018). В годы с достаточным обеспечением влагой прибавка урожайности зерна максимальная, что подтверждается рядом исследований (Конарев, 1980; Павлов, 1984; Завалин, Пасынков, Пасынкова, 2003; Пасынкова, 2013; Завалин, Соколов, 2016; Никитин, 2017). При этом качество клейковины ухудшается, содержание белка в зерне уменьшается, особенно при промывном водном режиме (Павлов, 1984; Завалин, Соколов, 2016).

Вместе с тем Д.Н. Прянишников (1976), придавая большое значение производству и применению азотных удобрений, в то же время ратовал за широкое использование не только удобрений (минеральных и органических), но и всех источников биологического азота, какими являются, прежде всего, бобовые культуры, что представляет особый интерес для нечерноземной полосы с ее бедными дерново-подзолистыми почвами. Наряду с бобовыми культурами (клевер, люцерна, эспарцет, соя, горох, вика, люпин, сераделла) в качестве удобрения возможно использование зеленой и корневой массы других растений (горчица, рапс, редька масличная, сурепица, фацелия) (Лошаков, 1982, 2012, 2015). По мнению В.Г. Лошакова (2015), зеленое удобрение обладает целым рядом специфических свойств. Наиболее важным

является то, что в качестве сидерата используют сельскохозяйственные культуры, химический состав которых и по количеству, и по соотношению питательных веществ очень близок к химическому составу и к потребностям в питательных веществах удобряемых культур. Это делает зеленое удобрение исключительно ценным удобрительным материалом, особенно в условиях снижения применения в сельском хозяйстве навоза. С 1990 года применение органических удобрений снизилось, по разным источникам, в 3–4 раза и в среднем по стране опустилось до 0,9–1,3 т условного навоза на 1 га пашни (Мерзлая, Державин и др., 2012; Лошаков, 2015; Loshakov, 2015; Кудеяров, 2015; Кудеяров, Соколов, Глинушкин, 2017).

Многочисленными исследованиями установлено, что систематическое применение сидератов не только сохраняет естественное плодородие почвы, но и способствует достижению его расширенного воспроизводства, в том числе улучшает структуру почвы, обогащает ее элементами питания, и в первую очередь углеродом и азотом, а также обеспечивает стабильный рост урожайности сельскохозяйственных культур (Тимирязев, 1936; Прянишников, 1976; Дояренко, 1921; Воробьев, 1979, 1982; Кант, 1982; Лошаков, 1980, 1982, 2012, 2015; Лошаков, Иванов, Синих, 1997; Лошаков, Николаев, 1999; Довбан, 2009; Довбан, Бердников, Довбан В.К., 1992; Бердников, 1990; Заикин, 1996; Румянцев, 2000; Бердников, Чмель и др., 2014; Авиллов, Соколов и др., 2016; Семенов, Ходжаева, 2006; Методические рекомендации по использованию сидеральных..., 2009). В зависимости от вида сидерата, дозы внесения, сельскохозяйственной культуры и типа почв варьирует прибавка урожайности. Рост урожайности зерна от применения сидерата на озимой пшенице составляет 1,2–1,9, озимой ржи – 1,2–1,7, ячменя – 1,4–2,0, яровой пшеницы – 1,2–1,6, овса – 1,1–1,8 раза (Лошаков, 1982, 2012, 2013а, 2015; Заикин, 1996; Серегин, 2000; Заикин, Ивенин и др., 2004; Довбан, 2009; Методические рекомендации по использованию сидеральных..., 2009; Новоселов, 2011; Матюк, Гогмачадзе и др., 2010; Матюк, Селицкая, Солдатова, 2013; Солдатова, 2011; Борисова, 2014, 2015).

Особенностью сидератов как удобрений является то, что их химический состав, и в частности соотношение питательных веществ, близок к аналогичным показателям для основных сельскохозяйственных культур, что определяет ее соответствие потребностям растений в основных элементах питания. Внесение в почву биомассы сидератов, наряду с растительными остатками и минеральными удобрениями, позволяет сократить дисбаланс между выносом питательных веществ с урожаем и поступлением их в почву (Лошаков, 1982; Довбан, 2009; Матюк, Гогмачадзе и др., 2010; Постников, Лошаков и др., 2014; Глушков, 2013; Огородников, Постников, 2015). Научно-обоснованное применение сидератов обеспечивает повышение биологической активности почвы, усиливает процессы трансформации органического вещества, сокращает потери питательных веществ из пахотного слоя (Лошаков, 2013б; Кузьминых, Манишкин, Габдуллин, 2011), а также улучшает азотный режим почв (Лошаков, 2015; Серегин, 2000).

Существенное влияние на продуктивность и качество яровых зерновых культур оказывает правильный подбор доз и сроков внесения сидератов (Воробьев, 1979, 1982; Лошаков, 1982; 2015; Лошаков, Элмер и др., 1995;

Довбан, 2009; Матюк, Гогмачадзе и др., 2010; Солдатова, 2011; Мингалев, 2015; Долгополова, 2017).

По мнению С.Н. Никитина (2015), при разложении в почве свежего органического вещества сидеральных культур происходит улучшение химических, физических и биологических свойств почвы, увеличивается удельный вес биологически связанного азота (в случае возделывания бобовой культуры), снижается кислотность, повышается буферность почвы. При этом сидерация обеспечивает поступление органического вещества в почву, эквивалентного 30–50 т/га подстилочного навоза (Зезюков, Придворев и др., 1996; Никитин, 2017).

Другой особенностью сидератов является то, что они переводят в органическую форму минеральные элементы питания растений и тем самым предохраняют их от вымывания, что снижает загрязнение грунтовых вод и окружающей среды в целом. Минеральные элементы питания из сидератов, поступая в почвенный раствор в процессе медленного и непрерывного разложения органической массы в течение всего летнего периода, не накапливаются в почве в избыточных количествах, а расходуются постепенно (Матюк, Селицкая, Солдатова, 2013).

Оценивая эффективность сидерата как вида удобрения, необходимо сказать и об использовании его азота растением. В.Г. Лошаков (2015) отмечал, что с учетом последствий из минеральных удобрений используется 60–70%, а из органических удобрений (навоз, растительные остатки, зеленое удобрение) – до 50–60%. В.В. Серегин (2000) определил, что при использовании на дерново-подзолистой почве в качестве зеленого удобрения бобовых культур (клевер, горох) использование ячменем азота сидерата составляет 12–21%. При совместном применении $\frac{1}{2}$ N аммиачной селитры и $\frac{1}{2}$ N наземной массы клевера от дозы внесения использования ячменем азота из зеленого удобрения возрастает до 38%. Сложные микробиологические процессы превращений органических удобрений в значительной степени связаны с содержанием азота в органическом веществе и соотношением в нем между количеством углерода и азота. Важное условие использования сидеральных культур – получение наибольшей массы при оптимальном соотношении углерода к азоту. Лучшими в этом отношении являются бобовые культуры, также положительно влияют и крестоцветные – горчица, редька масличная, рапс (Виниченко, 1987; Довбан, 2009). Экспериментально установлено, что при содержании в органическом веществе менее чем 1,5% азота (в пересчете на сухое вещество) основная его масса потребляется почвенными организмами, разлагающими это вещество, происходит иммобилизация высвободившихся доступных форм азота без отдачи их растениям (Мишустин, 1972; Лошаков, 2015). Существенное значение на коэффициент использования азота из органических удобрений имеет соотношение в нем C : N (Смирнов, 1977; Лошаков, 1982; 2015; Бердников, 1990; Синих, 2010; Li et al., 2015). Биологическая иммобилизация азота удобрения протекает наиболее активно при широком соотношении C : N – больше 30, что хорошо заметно при использовании соломы зерновых культур (C : N = 40-80:1) (Лошаков, 2012, 2015). Чем больше в органическом удобрении концентрация азота и уже соотношение C к N (C:N≤12-14), тем

меньше иммобилизация азота, лучше обеспеченность им возделываемых растений, выше их урожайность – это сопровождается ростом потерь азота в основном за счет денитрификации (Aulakh et al., 2000). Приближение в органическом удобрении соотношения С : N к 10 приводит к тому, что иммобилизация азота удобрения ослабевает или отсутствует. А.И. Осипов и О.А. Соколов (2001) отмечали, что при соотношении в органическом удобрении С : N равном 21 и более минерализация органических веществ в почве практически прекращается. Вместе с тем по-прежнему остается вопрос об оптимальном соотношения С : N в органическом удобрении, при котором возделываемым растением максимально используется его азот, а потери минимальны.

Важное значение для использования азота удобрения имеет и соотношение С : N в самом органическом веществе почвы. Для большинства почв отношение С : N составляет 8–12, однако бывают и значительные отклонения от этой величины. Например, в торфяных почвах наблюдается более широкое соотношение углерода и азота – 15–35, что связано с высоким содержанием в них негумифицированных остатков (Кудеяров, 1989; Семенов, Кузнецова, Кудеяров, 1995; Орлов, Бирюкова, Суханова, 1996; Серегин, 2000).

Устойчивое развитие агропромышленного комплекса предусматривает удовлетворение потребностей общества в продукции сельскохозяйственного производства на фоне сохранения нормального состояния биосферы. В связи с тем, что 70–75% азота в урожае сельскохозяйственных культур имеет иное, чем азот удобрения происхождение: это азот биологический и азот минерализующегося органического вещества почвы, также преимущественно микробиологического происхождения, поэтому азотфиксация выделена наряду с фотосинтезом в ряд основных физиологических процессов, а биологический азот рассматривается как фактор формирования плодородия почвы и резерв для сельскохозяйственных культур (Тихонович, Завалин, 2016). Важной задачей является оценка вклада в формирование урожайности и качества растениеводческой продукции сельскохозяйственных культур инокуляции ассоциативными diaзотрофами. По разным исследованиям применение биопрепаратов на основе штаммов ассоциативных diaзотрофов приводит к росту урожайности зерновых в среднем на 15–20%, овощных культур – 20–30% (Тихонович, Завалин, 2016). В результате применения Флавобактерина возрастает урожай зерновых на 3–5, сена кормовых трав – на 8–20, сахарной свеклы – на 30–60 и овощей – на 15–60 ц/га (Тихонович, Кодемяков, Чеботарь и др., 2005). Различные штаммы *Azospirillum* повышают не только урожайность зерна яровой пшеницы на 10–30%, но и способствуют увеличению таких характеристик, как высота растения, масса 1000 зерен и содержание N в зерне (Mertens et al., 1984).

Влияние биопрепаратов на продуктивность сельскохозяйственных культур определяется погодными условиями вегетационного периода и уровнем плодородия почвы. В случае недостатка атмосферных осадков в период вегетации урожайность от инокуляции микроорганизмами не

изменяется. По мнению ряда исследователей, при количестве осадков, близком к среднемноголетней норме, использование ассоциативных биопрепаратов эквивалентно внесению азотного удобрения под озимые пшеницу, рожь и тритикале, а также ячмень и овес в дозе 30 кг/га, под яровую пшеницу – 30–45 кг/га, под кукурузу – 45–60 кг/га и под картофель 40–45 кг/га (Виноградова, 1999 (а); Сиддики, 2001; Волков, 2003; Завалин, 2005, 2011; Сиддакова, 2005; Тихонович, Завалин, 2016).

Опыты, проводившиеся в течение длительного времени с препаратами Ризоагрин (*Agrobacterium radiobacter*) и Флавобактерин (*Flavobacterin*), показали, что в ряде случаев эти препараты на дерново-подзолистых почвах, в зависимости от погодных условий, могут увеличивать урожайность зерна яровых зерновых культур на 8–45% (Завалин, Кандаурова, Чернова, 1997; Завалин, Кожемяков и др., 2001, Завалин, Пасынков, Пасынкова, 2003; Завалин, Духанина и др., 2003; Завалин, Алметов и др., 2009, 2010; Кандаурова, 1997; Виноградова, 1999 (а), 1999 (б); Зинковская, 1999; Сиддики, 2001; Бердников, 2002; Завалин, 2003, 2005; Сологуб, 2005; Тарасов, 2005; Быков, 2006; Хусайнов, 2006; Новоселова, 2007; Безгодова, 2009; Горячкин, 2013; Суков, 2015), на серых лесных почвах – на 9–42% (Сологуб, 2005; Сержанов, Шайхутдинов и др., 2013).

Наряду с отечественными исследователями положительные результаты от инокуляции препаратами *Azospirillum*, выраженные прибавкой урожая 5–40% получены и за рубежом (Okon, 1995; Fallik, et al., 1996 (а), 1996 (б); Galal et al., 2000).

В опытах на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве в Московской области прибавка урожая зерна яровой пшеницы от Ризоагрина в среднем составила 6,0 ц/га или 45% на фоне фосфорно-калийного удобрения, на фоне NPK – 3,9 ц/га или 20%. При этом эффективность Ризоагрина на зерновую продуктивность равноценно внесению минерального удобрения в дозе 45 кг/га. Вместе с тем в годы с засушливым периодом в первую половину вегетации эффективность биопрепаратов проявлялась только на фоне азотного удобрения (Кандаурова, 1997). В другом опыте на дерново-подзолистой почве селекционной станции МСХА предпосевная обработка семян препаратами ассоциативных азотфиксаторов достоверно увеличивала зерновую продуктивность яровой пшеницы на 15–19%. В благоприятные по погодным условиям годы действие биопрепаратов было равноценно внесению минерального азотного удобрения в дозе 30 кг/га (Виноградова, 1999 (а)).

В эксперименте, проведенном в Луховицком районе Московской области на светло-серой лесной почве с низким плодородием, применение Ризоагрина и Флавобактерина обеспечивало тенденцию повышения массы зерна ячменя, эквивалентную внесению азотного удобрения N₃₀ (Сиддики, 2001).

Исследования, проведенные в Республике Марий Эл на дерново-подзолистых почвах разной степени окультуренности и разного гранулометрического состава, показали, что инокуляция семян яровой пшеницы Ризоагрином и Флавобактерином увеличивала зерновую продуктивность

яровой пшеницы на всех фонах минерального питания. Прибавки урожая зерна на фоне без удобрений и на фоне $P_{60}K_{60}$ составили 2,1 – 2,3 ц/га (+11-13%) и 2,6 – 2,8 ц/га (+12-14%) на фоне $N_{30}P_{60}K_{60}$. В благоприятные по метеорологическим условиям годы прибавки урожая зерна возрастали на фоне $N_{30}P_{60}K_{60}$ до 4,4 – 4,7 ц/га (+15-17%) и на фоне $P_{60}K_{60}$ до 3,1 – 3,6 ц/га (+13-16%). При недостатке осадков в первой половине вегетационного периода эффективность биопрепаратов проявлялась только на фоне азотного удобрения (Алметов, Бердников, 1999; Бердников, 2002; Завалин, Алметов, 2009).

В экспериментах на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве Марийского государственного университета инокуляция семян Флавобактерином способствовала росту урожайности яровой пшеницы по пласту клевера на фоне $P_{60}K_{60}$ в среднем на 0,29 т/га или 12%, на фоне $N_{30}P_{60}K_{60}$ – на 0,44 т/га или 14%. Вместе с тем эффект от применения азотного удобрения в дозе N_{30} был существенно больше – 0,73 т/га или 30% (Горячкин, 2013).

В другом эксперименте, проведенном в Республике Марий Эл, на малогумусной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве максимальное увеличение урожайности зерна ячменя на 0,39 т/га наблюдалось при инокуляции его семян Флавобактерином на фоне $N_{30}P_{60}K_{60}$ и было равноценно внесению N_{30} (Евдокимова, 2005).

Применение Флавобактерина в посевах ярового ячменя на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве в условиях Вологодской области обеспечивало прибавку урожайности зерна на 9–10% как на фоне внесения РК-удобрений, так и N_{30} РК-удобрений. Эффект от биопрепарата был эквивалентен внесению N_{30} (Безгодова, 2009).

Эффект от биопрепаратов, сопоставимый с определенной дозой азота, отмечается не только на дерново-подзолистых почвах. На черноземных почвах Сибири по своему действию на зерновую продуктивность злаков эффект биопрепаратов составляет в среднем 10–20% к уровню продуктивности не инокулированных посевов, что сопоставимо с действием минерального азота в дозе N_{20-40} (Шотт, 2007).

В других полевых опытах эффективность применения биопрепаратов на яровых зерновых культурах существенно уступала действию азотного удобрения N_{30-45} (Волков, 2003; Тарасов, 2005; Аужанова, 2015). В отдельных экспериментах прибавка урожайности зерна от инокуляции биопрепаратами diaзотрофов отмечена не каждый год (в два из трех лет) (Лекомцев, 2002; Пасынков, 2004).

Применение в сельском хозяйстве биопрепаратов чистых культур ассоциативных азотфиксирующих бактерий часто дает непредсказуемые результаты. Один из возможных путей решения этой задачи – применение естественных смешанных ризосферных культур бактерий. Так инокуляция ассоциацией *Klebsiella terrigena* и *Bacillus firmus* семян ячменя в полевых и вегетативных опытах давала 10–30% увеличение урожайности, в то время как обработка каждым компонентом в отдельности не давала значительного увеличения урожая (Злотников, 1998).

Почвенно-климатические условия оказывают наиболее значительное

влияние на эффективность биопрепаратов, в этой связи представляется необходимым и возможным с использованием методов математического моделирования разработка прогнозов прибавки урожайности яровых зерновых культур от инокуляции препаратами diaзотрофов. Тем более к этому есть определенные предпосылки. Так с применением методов концептуального моделирования разработаны модели и прогнозы эффективности минеральных удобрений от агрохимических свойств почв на зерновых культурах (Прошкин, Андрианов, Шаброва, 2011; Козеичева, 2011; Прошкин, Козеичева, 2015; Шафран, Козеичева, 2016), картофеле (Прошкин, Швыркина, 2013; Прошкин, 2014), льне (Налиухин, 2015). Подробно о данном вопросе в главе 6.

Рост урожайности высококачественного зерна от удобрений достигается не только исходя из особенностей биологии сельскохозяйственных культур, агротехники их возделывания, почвенно-климатических условий местности, уровня плодородия почвы, но и выбором удобрений как минеральных, так и органических с учетом величин возможных потерь, иммобилизации в почве, размеров потребления элементов питания растениями (Смирнов, 1970, 1977; Турчин, 1972; Кореньков, 1976, 1999; Кидин, 1993; Серегин, 2000; Завалин, Соколов, 2016).

Важное значение в цикле азота отводится почвенной микробиоте. По данным ряда ученых. количество живой биомассы микроорганизмов в почве колеблется в пределах 10–15 т/га (Мишустин, 1972; Турчин, 1972; Завалин, Соколов, 2016). По данным А.А. Завалина, О.А. Соколова (2016), в этой биомассе содержится 200–300 кг N/га. Продолжительность жизни микробной клетки 15–20 суток, за период вегетации совершается 10–20 генераций, поэтому в круговорот вовлекается 2000–3000 кг N/га, а время оборачиваемости азота микробной биомассы в почве оценивается в 1,8–2,1 года.

Это важно, прежде всего, для понимания вопросов трансформации азота удобрений: минерализации-иммобилизации. В обычных условиях (без применения удобрений и биопрепаратов) минерализация органического вещества превалирует над процессом иммобилизации, вследствие чего в почве создается и постоянно присутствует определенный запас минерального азота – «нетто-минерализация». Внесенное в почву минеральное удобрение за первый месяц трансформируется в азот, поглощенный культурными и сорными растениями, иммобилизуется микроорганизмами, связывается в составе органического вещества, фиксируется глинистыми минералами и частично теряется (газообразные потери, вымывание с внутрпочвенным стоком и эрозией почвы) (Кореньков, 1976, 1999; Гамзиков, 1981, 2013; Будажапов, 2009). При этом необходимо отметить, что в агроэкосистеме при использовании удобрений запас минерального азота зависит от общего количества поступившего и связанного азота, с одной стороны, и от активности микроорганизмов, участвующих в различных циклах его превращения, – с другой (Кореньков, 1999; Шмырева, Соколов, Завалин, 2014).

Изучение процессов превращения азота в почве с познанием внутрпочвенного азотного цикла, включающего нитрификацию, денитрификацию,

иммобилизацию, минерализацию и азотфиксацию, позволяет установить и рассчитать баланс этого элемента. Исследования, проведенные с ^{15}N (Андреева, Щеглова, 1964, 1966, 1978; Турчин, 1972; Смирнов, 1970, 1973; Кореньков, Романюк и др., 1975; Кореньков, 1976, 1999; Помазкина, 1985; Руделев, 1992; Семенов, Кудеяров, Соколов, 1981; Кудеяров, 1989, 1999; Кудеяров, Кузнецова, 1990; Гамзиков, 1981, 2013; Кидин, 1993; Кузнецова, Тулина и др., 1998; Сычев, Соколов, Шмырева, 2009; Завалин, Соколов, 2016; Wagger et al., 1985; Mitovska, 1986; Hart et al., 1986; Vjarnasson, 1987; Chalk et al., 1993; Jensen, 1994a, 1994b; Barraclough, 1997; Boddey et al., 2000; Galal et al., 2000; Follet., 2001; Korsaeht et al., 2002; Steinbach et al., 2004; Manzoni et al., 2009), позволили существенно изменить представления о путях трансформации азота удобрений в системе «почва–растение», составить его баланс и оценить эффективность применения удобрений.

Вместе с тем влияние биопрепаратов на основе ассоциативных diaзотрофов на баланс азота удобрений в отечественных исследованиях недостаточно изучено. Большинство исследований с ^{15}N проводилось на песчаной культуре, в лабораторных условиях, и посвящено вопросам влияния доз азотных удобрений на величину ассоциативной азотфиксации (Сирота, 1982; Умаров, 1983, 1986; Шабаев, 2004). В полевом эксперименте с яровой пшеницей, проведенном в Московской области на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве, отмечено, что обработка семян биопрепаратами только в отдельные годы способствовала повышению коэффициента использования азота удобрения на 9–11% (Завалин, Кандаурова, Чернова, 1997; Кандаурова, 1997).

В микрополевым опыте с яровым ячменем на светло-серой лесной почве на территории Дединовской опытной станции, расположенной в Луховицком р-не Московской обл., исследования с ^{15}N показали, что Ризоагрин и Флавобактерин на низкоплодородной почве практически не влияют на использование азота удобрений ячменем, но увеличивают на средне- и высокоплодородной почве – на 3–8%. От их использования слабо изменялось закрепление азота удобрения в почве. Максимальные неучтенные потери азота удобрения происходили на низкоплодородной почве, где инокулянты обеспечивали дальнейшее их увеличение, а на почвах со средним и повышенным содержанием гумуса – снижали потери (Сологуб, 2005).

Таким образом, проведенные исследования с ^{15}N удобрений в полной мере не позволили установить влияние ассоциативной азотфиксации на статьи баланса удобрений, их изменение, поэтому необходимо продолжить исследование этого вопроса.

Другим важным вопросом, по мнению ряда ученых (Сычев, Соколов и др., 2012; Завалин, Соколов, 2016), является познание минерализационно-иммобилизационной оборачиваемости азота в почве. Это важно для понимания внутрпочвенных циклов азота и решения практических задач, таких как достижение синхронности процессов накопления в почве минерального азота и его усвоение сельскохозяйственными культурами, что предотвращает чрезмерную аккумуляцию нитратов в объектах окружающей среды, снижает газообразные потери азота. В этой связи

поле с возделываемой сельскохозяйственной культурой рассматривается как управляемая целостная агроэкосистема взаимодействующих друг с другом компонентов (почва – микроорганизмы – растения – атмосфера) с характерными свойствами (Миркин, Наумова, Хазиахметов, 2001; Помазкина, Котова, Лубнина, 1999; Помазкина, 2004, 2018).

Особенностью агроэкосистем является общность признаков: развитие, потоки, энергии, пищевые цепи, управление, круговороты или циклы биофильных элементов. Антропогенный фактор в агроэкосистеме реализуется в виде непосредственного воздействия на ее структуру, пищевые цепи, круговороты энергии и питательных веществ, в результате чего изменяются режимы в почве, численность и видовое разнообразие растений и микроорганизмов, а сама агроэкосистема приобретает ряд специфических характеристик, свойственных конкретному типу хозяйственной деятельности человека (Сычев, Соколов и др., 2012; Соколов, Завалин, Сычев и др., 2015; Завалин, Соколов, 2016).

Оценка функционирования агроэкосистемы возможна как по комплексу признаков ее характеризующих, так и по отдельному – гумусу, элементам питания растений, энергии и т.д. Для оценки воздействия современных систем земледелия на агроэкосистему применяется понятие «устойчивость». По мнению В.А. Черникова (2000), устойчивость агроэкосистемы – свойство системы сохранять и поддерживать значения своих параметров и структуры в пространстве и времени, качественно не меняя характер функционирования. Параметрами устойчивости агроэкосистемы являются функции, режимы и свойства почвы, структура, организация и продуктивность агрофитоценоза.

Наиболее подробно работа агроэкосистемы представлена в работе Л.В. Помазкиной (2004) на примере распределения потоков азота (рис. 1).

Минерализованный за период вегетации сельскохозяйственных культур азот почвы, по мнению Л.В. Помазкиной (2004), рассматривается как «вход» вещества в систему. Нетто-минерализованный азот (Н-М) является «выходом», и «возвратом на выходе» служит реиммобилизованный азот (РИ), идущий на поддержание системы (Сычев, Соколов и др., 2012). Показатель Н-М характеризует поток азота во внешний, или автотрофный, цикл, а РИ – поток (возврат) во внутрпочвенный. Отсутствие количественных различий между этими потоками указывает на замкнутость циклов азота (Помазкина, 2004; Помазкина, Котова и др., 2008; Соколов, Завалин, Сычев и др., 2015). Считается, что 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 близкой 50%. Рециркуляцию можно рассматривать как трансформацию (обмен) азота между компонентами агроэкосистемы, относительно его количества на «входе», т.е. возврат в круговорот. По мнению Л.В. Помазкиной (2004), возврат, обусловленный активностью биологических и биохимических процессов в почве, по сути, является одним из природных гомеостатических механизмов на данном

уровне организации. Чем выше значение соотношения $H-M : PИ$, тем менее устойчива система. В то же время чем ниже значение отношения $PИ : M$ (циркуляция азота), тем менее устойчива система.

Кроме всего, исследователями отмечалось, что реиммобилизованный азот представляет собой новообразованные вещества (структуры), с которыми связано функционирование системы гумусовых веществ. Выявленные с помощью меченого изотопа азота новообразования включаются во все фракции гумусовых веществ. Участвуя в обновлении гумуса, они поддерживают его ресурс и качество, формируя в основном фонд метаболического (лабильного) азота (Помазкина, Лубнина и др., 1996; Лаврентьева, Помазкина, 1999; Помазкина, 2004).

Одновременно стоит отметить, что самоорганизованная смена режимов функционирования агроэкосистем происходит в зависимости от изменения антропогенной нагрузки (удобрения). Для определения степени устойчивости разработаны критерии интегрированной оценки режимов функционирования агроэкосистем и уровней воздействия на них (Помазкина, Котова, Лубнина, 1999; Помазкина, Соколова и др., 2011; Помазкина, 1985, 2004, 2018; Сычев, Соколов и др., 2012) (табл. 1.2).

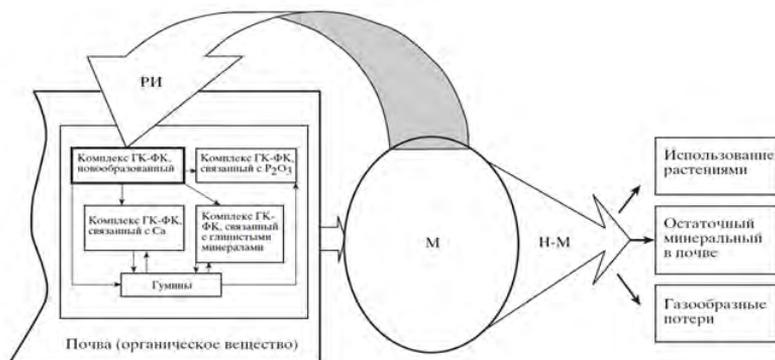


Рис. 1. Схема потоков азота в агроэкосистеме (Помазкина, 2004)

В большинстве исследований, посвященных изучению устойчивости агроэкосистемы, оценивается антропогенное воздействие в виде загрязнения солями тяжелых металлов, фторидами (Помазкина, 2004; Помазкина, Котова, Лубнина, 1999, Помазкина, Котова и др., 2008, Помазкина, Соколова и др., 2011; Кириллова, Помазкина, 2014).

Таблица 1.2
Критерии режимов функционирования агроэкосистем

Режим функционирования	Уровень воздействия	Критерии	
		$PИ : M, \%$	$H - M : PИ$
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 истощение	Критический	$20 - 10$	$4,2 - 9,0$
Репрессия	Недопустимый	< 10	$> 9,0$

Исследования вопросов устойчивости агроэкосистемы с помощью метода изотопной индикации (^{15}N) не многочисленны. В них оценивались размеры и основные факторы пространственной дифференциации газообразных потерь азота удобрений и азота почвы на различных элементах эрозионного агроландшафта при выращивании сельскохозяйственных культур: многолетних трав (Шмырева, Соколов, Завалин, 2014; Шмырева, Соколов и др., 2016; Соколов, Завалин, Шмырева и др., 2015; Соколов, Шмырева, Завалин и др., 2016), ячменя (Шмырева, Соколов, Завалин и др., 2017; Соколов, Черников, Васенев, 2015) овса (Шмырева, Соколов, Завалин, 2017), озимой ржи (Соколов, Шмырева, Завалин, 2016), озимой пшеницы (Завалин, Соколов, Шмырева, 2018). Однако потоки азота и устойчивость агроэкосистемы рассматриваются при применении минеральных и органических удобрений. Участие ассоциативных диазотрофов не учитывается.

Из рассмотренного обзора видно, что, несмотря на значительные успехи в познании вопросов круговорота азота, к настоящему времени существуют весьма разные и противоречивые сведения, описывающие влияние биопрепаратов ассоциативных азотфиксаторов на урожайность яровых зерновых культур, трансформацию азота в системе удобрение – почва – растение и устойчивость агроэкосистемы. В свою очередь, это затрудняет сделать научно обоснованный прогноз эффективности биопрепаратов на яровых зерновых культурах, возделываемых в Нечерноземной зоне. Именно поэтому в настоящей работе предстояло уточнить: действие и взаимодействие биопрепаратов и удобрений на прибавку урожайности от отдельных агрохимических показателей почвы, метеорологических условий возделывания; влиянием факторов внешней среды, окультуренности почвы и агротехнологических приемов (в том числе применение биологических препаратов на основе штаммов диазотрофов) на интенсивность и направленность превращения азота удобрений.

Глава 2. Условия и методика проведения исследований

Особая актуальность в изучении взаимодействия сельскохозяйственных растений и микроорганизмов обусловлена поиском дополнительного источника азотного питания, поскольку в конце XX – начале XXI века наблюдается резкое сокращение применения в сельском хозяйстве минеральных и органических удобрений. Тем более что ризосферные микроорганизмы наряду с азотфиксацией продуцируют физиологически активные вещества, которые, воздействуя на растения, стимулируют их рост и развитие (Завалин, 2005).

В этой связи изучение в опытах эффективности применения биопрепаратов ассоциативных микроорганизмов соответствует методике проведения полевых исследований по применению удобрений, но имеет некоторые особенности. В соответствии с методикой «Оценка эффективности микробных биопрепаратов в земледелии» (2000) приводится

принципиальная схема изучения действия биопрепаратов на различных сельскохозяйственных культурах (рис. 2) (Завалин, 2005).

Методика оценки эффективности применения биопрепаратов на яровых пшенице и ячмене на разных фонах минерального питания и типах почв в Европейской части России. Оценку эффективности биопрепаратов диазотрофов проводили по результатам собственных исследований и исследований, выполненных Географической сетью опытов в 1996–2016 гг. с сортами яровой пшеницы и ячменя, включенными в реестр региона России. Опыты проводили с яровой пшеницей: на дерново-подзолистых (песчаные, супесчаные – 4 опыта, легкосуглинистые – 5, среднесуглинистые – 8), серых лесных (4 опыта) и черноземных почвах (4 опыта) разного гранулометрического состава; яровым ячменем – на дерново-подзолистых (песчаные, супесчаные – 3 опыта, легкосуглинистые – 6, среднесуглинистые – 8), серых лесных (6 опытов) и черноземных почвах (6 опытов). Регионы: Брянская, Воронежская, Ивановская, Кировская, Московская, Пензенская, Рязанская, Смоленская, Тверская, Ульяновская области, Республика Татарстан, Республика Марий Эл, Удмуртская Республика, Республика Мордовия (Завалин, Кожемяков и др., 2001; Завалин, Пасынков, 2007, Завалин, Алметов, 2009; Завалин, Алметов, Чернова, 2014; Завалин, 2003, 2005; Сергалиев, 1998; Виноградова, 1999 (а); Сиддики, 2001; Бердников, 2002; Леконцев, 2002; Волков, 2003; Пасынков, 2004; Шаркова, 2004; Евдокимова, 2005; Сологуб, 2005; Тарасов, 2005; Хусайнов, 2006; Зарипов, 2008; Безгодова, 2009; Валиуллин, Гилязов, 2010; Шакиров, Гилязов, 2010; Башков, 2011; Ляличкина, 2011; Горячкин, 2013; Алферов, Чернова и др., 2016; Алметов, Чернова и др., 2012; Алметов, Горячкин и др., 2012; Алметов, Габдуллин, Алферов, 2016; Шкотова, 2016; Никитин, 2017 и базы данных опытов с удобрениями и биопрепаратами ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова и ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии).

Проведение опытов, учет урожая, определение химического состава яровой пшеницы и агрохимических свойств почв проводили по общепринятым стандартным методикам. В работах, в которых не приведены данные по содержанию азота в урожае, показатели взяты из нормативных справочных материалов (Нормативы выноса..., 1991). Схемы опытов: 1. $P_{30-90}K_{30-90}$ (фон); 2. фон + N_{30} ; 3. фон + биопрепарат; 4. фон + N_{30} + биопрепарат. Доза азотного удобрения – 30 кг/га д.в. В качестве фона в опытах применяли Рсд и Кх в дозах эквивалентных P_{30-90} и K_{30-90} соответственно. Семена яровой пшеницы и ярового ячменя обрабатывали биопрепаратами Ризоагрин и Флавобактерин, изготовленными во ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии, созданными на основе штаммов, относящихся к роду *Agrobacterium radiobacter* и роду *Flavobacterium* (Завалин, 2005).

Определение эффективности биопрепаратов под сельскохозяйственные культуры

Determination of the Effectivity of Biopreparations on Crops

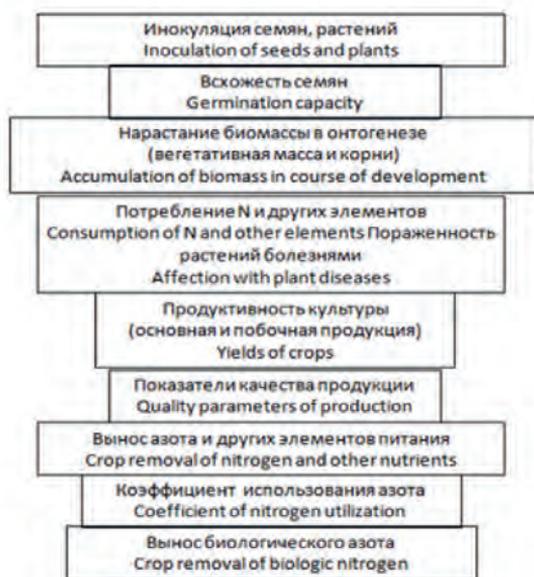


Рис. 2. Схема изучения действия биопрепаратов на сельскохозяйственных культурах (Завалин, 2005)

Оценку размеров ассоциативной азотфиксации определяли с использованием разностного метода (метод сравнения по выносу азота) (Оценка эффективности..., 2000), а для одной почвенной разности – как средневзвешенное значение.

Методика расчетов для прогнозирования прибавки урожайности и эффективности биопрепаратов. Оценка эффективности минеральных азотных удобрений и биологических препаратов на основе ризосферных ассоциативных микроорганизмов в Нечерноземной зоне России и уточнение баланса азота в системе «почва – растение – удобрение» проводили с использованием данных полевых опытов с яровыми зерновыми культурами (яровая пшеница, ячмень), выполненными научными организациями (базы данных Лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий Всероссийского научно-исследовательского института сельскохозяйственной микробиологии (заведующий лабораторией А.П. Кожемяков) и лаборатории агрохимии минерального и биологического азота Всероссийского научно-исследовательского института имени Д.Н. Прянишникова, научные статьи) с 1996 по 2015гг.

В целях определения влияния отдельных агрохимических свойств почвы и метеорологических условий возделывания яровых зерновых культур на эффективность биопрепаратов ассоциативных микроорганизмов и азотных

удобрений был использован метод математической статистики – метод математического моделирования, который позволяет оценить наиболее перспективные комбинации сочетания агрохимических свойств почвы и метеорологических условий для получения максимального прироста урожайности яровых зерновых культур (Прошкин, Андрианов, Шаброва, 2011; Сычев, Соколов, Шмырева, 2009).

В выборку включали полевые опыты, схема которых позволяла вычленить действие биопрепаратов и азотных удобрений, а также их взаимодействие на фоне фосфорно-калийных удобрений (РК).

В анализе использовали экспериментальные данные о прибавках урожайности яровой пшеницы и ячменя, такого же количества изменений величин каждого изучаемого фактора: гумуса (по Тюрину), показателей реакции почвенной среды (величина кислотности (pH_{KCL}), метеорологических условий вегетации – гидротермического коэффициента по Г.Т. Селянинову (ГТК).

В данной работе проанализированы и обобщены результаты 47 полевых опытов на яровой пшенице и 43 полевых опытов на ячмене с азотными удобрениями и биологическими препаратами на основе ризосферных ассоциативных микроорганизмов, проведенных в центральном районе Нечерноземной зоны России на дерново-подзолистых почвах. Все выборки характеризуются как большие, и они охватывали практически весь возможный диапазон агрохимических свойств почв и метеорологических условий выращивания сельскохозяйственных культур.

Для установления всей сложности структурных взаимосвязей в системе «почва – растение – удобрение» использовали предложенный Т.Н. Кулаковской (1990) метод комплексной оценки влияния вариации величин агрохимической характеристики почвы на эффективность азотного удобрения и биопрепаратов, основанный на математическом моделировании и позволяющий получить статистически достоверные количественные оценки влияния факторов на формирование урожайности яровой пшеницы и ячменя (Прошкин, Андрианов, Шаброва, 2011; Прошкин, 2012; Прошкин, Швыркина, 2013; Сычев, Шафран, 2012). В модели также включен такой показатель, как гидротермический коэффициент по Г.Т. Селянинову (ГТК), характеризующий метеорологические условия выращивания сельскохозяйственных культур.

В целях установления влияния отдельных факторов (агрохимических свойств почвы, метеорологических условий) на изменчивость результативного признака (прибавку урожайности зерна) был проведен корреляционный анализ с использованием таких статистических характеристик, как коэффициент корреляции (r) и корреляционное отношение (η), выражающих тесноту (силу), направление связи между изучаемыми факторами. Долю изменчивости оценивали по коэффициенту детерминации (d_{yx}) и индексу детерминации (η^2). Выбор формы корреляции для описания связи между изучаемыми признаками (линейная или криволинейная зависимость) осуществляли по критерию линейности корреляции (F) (Доспехов, 1985; Литтл, Хиллз, 1981; Прошкин, Андрианов, Шаброва, 2011; Налиухин, 2015). Расчет корреляционного отношения проводили путем группировки исход-

ного материала в интервальный ряд. Ширину классового интервала определяли с учетом варьирования независимого признака (**X**), позволяющего выявить степень влияния отдельных параметров агрохимических свойств почвы и метеорологических условий на величину прибавки урожайности зерна на 5 % уровне значимости.

В основу прогноза эффективности биопрепаратов и азотного удобрения в зависимости от гумуса, показателя реакции почвенной среды (величина кислотности (pH_{KCL}) дерново-подзолистых почв и гидротермического коэффициента по Г.Т. Селянинову были выведены регрессионные уравнения отдельно по каждому фактору. При этом учитывалась доля их участия в формировании прибавки урожайности зерна (Кулаковская, 1990; Прошкин, Андрианов, Шаброва, 2011; Налиухин, 2015). Расчет относительного вклада проводился по формуле:

$$OB = \eta^2_{\Phi 1} \cdot 100 / (\eta^2_{\Phi 1} + \eta^2_{\Phi 2} + \eta^2_{\Phi 3}), \quad (1)$$

где: **OB** – относительный вклад фактора;

η – корреляционное отношение;

Φ1 ... Φ3 – изучаемые факторы.

Количественный вклад изучаемых факторов определялся по величине их относительного вклада и прибавке урожайности по формуле:

$$KB = M\Phi \cdot OB, \quad (2)$$

где: **KB** – количественный вклад фактора в формирование прибавки урожайности зерна, ц/га;

MΦ – максимум функции изучаемого фактора. В данном случае – прибавки урожайности, ц/га.

Корректный прогноз (модель) изменчивости прибавки урожайности в общем виде представляется как аппроксимационный алгоритм в следующей алгебраической форме:

$$Y = (a_{n1}x_{n1}^2 + b_{n1}x_{n1} + c_{n1}) + (a_{n2}x_{n2}^2 + b_{n2}x_{n2} + c_{n2}) + (a_{n3}x_{n3}^2 + b_{n3}x_{n3} + c_{n3}) \quad (3)$$

где: x_{n1} – содержание гумуса, x_{n2} – pH_{KCL} , x_{n3} – ГТК (период), a_{n1} , a_{n2} , a_{n3} , b_{n1} , b_{n2} , b_{n3} , – коэффициенты уравнения, c_{n1} , c_{n2} , c_{n3} , – свободные члены.

Изменчивость прибавки урожайности зерна рассчитывали при различных агрохимических свойствах почвы и метеорологических условиях выращивания яровых зерновых культур с использованием аппроксимационного алгоритма. Полученные в расчетах прибавки урожайности зерна сводили в таблицы так, чтобы можно было описать выявленные особенности поведения модели.

Для оценки эффективности азотного удобрения при инокуляции биопрепаратами ассоциативных диазотрофов в зависимости от агрохимических свойств почвы и метеорологических условий рассчитывали окупаемость как величину прибавки урожайности (кг), полученной от внесения 1 кг д.в. азота удобрения.

С целью изучения действия ризосферных биопрепаратов ассоциативных азотфиксаторов на урожайность и качество продукции сельскохозяйственных культур, а также исследования баланса азота и выявления роли различных источников азотного питания растений в формировании урожая ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова предложена схема проведения эксперимента с использованием стабильного изотопа ^{15}N . Схема включает два фона минерального питания растений: 1) применение фосфорных и калийных удобрений; 2) применение азотных, фосфорных и калийных удобрений. На обоих фонах производится посев инокулированных микробными биопрепаратами семян сельскохозяйственных культур («Оценка эффективности микробных биопрепаратов в земледелии», 2000).

С использованием вышеуказанной схемы проведены исследования со следующими биопрепаратами:

Препарат Ризоагрин изготовлен во ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии. Характеристика биопрепарата: **Ризоагрин** – создан на основе штамма, относящегося к роду *Agrobacterium radiobakter* (штамм 204). Штаммы, используемые для производства Ризоагрина, характеризуются рядом преимуществ: образуют активные ассоциации между растениями и микроорганизмами, способны фиксировать атмосферный азот и переводить его в легко усваиваемую форму азотсодержащих соединений. Высокая их конкурентоспособность по отношению к фитопатогенным грибам повышает устойчивость растений к болезням. В одном грамме торфяного препарата содержится 6–10 млрд клеток бактерий. Штамм хорошо приживается в ризосфере пшеницы, риса и других зерновых и кормовых злаковых трав. Согласно рекомендации ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии обработка зерна яровой пшеницы проводили в день посева из расчета 600 г препарата на 6 млн всхожих семян. В качестве прилипателя использовали 1 %-ный раствор казеина.

Экстрасол – жидкая форма микробиологического препарата, обладает ростстимулирующим и защитным действием. Основу препарата составляет штамм ризосферных бактерий *Bacillus subtilis* Ч-13, выделенный из ризосферы здоровых растений. Штамм *Bacillus subtilis* Ч-13 обладает комплексом полезных свойств. Это и способность синтезировать в процессе своего роста вещества, подавляющие развитие фитопатогенных грибов и бактерий, являющихся возбудителями болезней растений. Кроме того, штамм *Bacillus subtilis* Ч-13 синтезирует вещества, стимулирующие рост и развитие растений. За счет активной колонизации корней растений полезные бактерии улучшают развитие корневых волосков и увеличивают их поглотительную способность. Таким образом, питательные элементы – азот, фосфор и калий – эффективнее усваиваются растениями из почвы и внесенных в нее удобрений. Бактерии *Bacillus subtilis* Ч-13, поселяясь на корнях растений, усиливают их иммунитет и устойчивость к стрессам, таким как заморозки или засуха.

В качестве эндофитных препаратов использовали Биопрепарат 1 (БП1) и Биопрепарат 2 (БП2). **Биопрепарат 1 (БП1)** – жидкая форма микробиологического препарата, обладает способностью к денитрификации и азотфиксации. Основу составляет *Bacillus megasterium* V-3, эндофит, выделенный из

внутренних тканей черенков винограда сорта Мускат черный (*Vitis vinifera* L.) и депонирован 7 ноября 2016 г. в Ведомственной коллекции полезных микроорганизмов сельскохозяйственного назначения (РСАМ) во Всероссийском НИИ сельскохозяйственной микробиологии под регистрационным номером РСАМ 04324.

Биопрепарат 2 (БП2) – жидкая форма микробиологического препарата, основу которого составляет *Bacillus subtilis* V4. Это эндофит из внутренних тканей черенков винограда сорта «Фетяска белая» (*Vitis vinifera* L.). *Bacillus subtilis* V4 проявляет бактерицидную активность по отношению к фитопатогенным бактериям и фунгицидную активность по отношению к грибам рода *Fusarium*.

Жидкая форма биопрепаратов Экстрасол, БП1 и БП2, изготовлена во Всероссийском НИИ сельскохозяйственной микробиологии. Повторность в опыте шестикратная. Варианты размещали методом рендомизированных повторений. Закладку микрополевого опыта проводили по общепринятым стандартным методикам.

Биопрепарат с рабочим названием **КЛ-10** создан на основе штамма ассоциативных ризобактерий, относящихся к роду *Pseudomonas* sp., выделен из ризосферы растений ячменя и обладает высокой ростстимулирующей активностью; биопрепарат с рабочим названием 17-1 создан на основе штамма ассоциативных ризобактерий, относящихся к роду *Pseudomonas* sp., выделен из ризосферы растений ячменя и обладает высокой антифунгальной активностью по отношению к спектру фитопатогенных грибов, а также высокой ростстимулирующей активностью. В 1 г препаратов содержится 5–10 млрд клеток бактерий, представляют собой порошковидные торфяные субстраты с влажностью 45–50%. Штаммы хорошо приживаются в ризосфере злаковых культур (Завалин, 2005).

Методы исследования. В исследованиях использовали общепринятые методы анализов почвенных и растительных образцов:

кислотность солевой вытяжки рНКСL – потенциметрически (ГОСТ 26483-85),

гумус – по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), подвижный фосфор и калий – в вытяжке 0,2 НСl по Кирсанову в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207-91).

Для определения содержания минерального азота в почве в конце вегетации растений яровой пшеницы из каждого сосуда в слое 0–20 см отбирали почвенные образцы. Определение нитратного азота ($N-NO_3$) в образцах натуральной влажности проводили ионометрическим методом (ГОСТ 26951-86), аммонийного ($N-NH_4$) – фотоколориметрическим (ГОСТ 26489-85). Содержание азота в растении (зерно, солома) определяли по методу Къельдаля согласно ГОСТ 13496.4-93, фосфор – колориметрически (ГОСТ 26657-97), калий – на пламенном фотометре (ГОСТ 30504-97). Изотопный состав азота определяли на масс-спектрометре «Delta V».

Расчет гидротермического коэффициента по Г.Т. Селянинову (ГТК) определяли как отношение суммы осадков (O) в мм за период со среднесуточными температурами воздуха выше 10 °С к сумме температур ($\sum t$) за это же время, уменьшенной в 10 раз, т. е. $ГТК = O/0,1\sum t$ (Журина, Лосев, 2012).

Статьи баланса азота определяли с применением классического разностного метода (метод сравнения по выносу азота) и разностного метода с использованием ^{15}N (Оценка эффективности..., 2000). Расчеты статей баланса азота (использование культурным растением, закрепление в почве) проводили с применением методики, описанной Д.А. Кореньковым (1999).

Статистический анализ экспериментальных данных проводили дисперсионным методом по модели трехфакторного полевого опыта с использованием программ EXCEL и STATISTICA. Достоверность различий оценивали по F-критерию Фишера.

Оценка режимов функционирования агроэкосистемы в посевах яровой пшеницы при применении удобрений и биопрепаратов проводилась по методике, изложенной в работах М. Fried, L. Dean (1952); Ф.В. Турчина (1965), Л.В. Помазкиной и др. (1999, 2004). Поскольку любая система почва–микроорганизмы–растения–атмосфера рассматривается как функциональная модель, в которой взаимодействующие компоненты объединяются потоками, то исследования построены на определении этих потоков. Методика расчетов потоков азота включает определение параметров минерализации, иммобилизации и потерь азота при внесении агрохимикатов и Ризоагрина и представлена в таблице 2.1.

Критерии нормирования режимов функционирования и уровней воздействия на агроэкосистему: **РИ : М, % и Н – М : РИ** (Помазкина, Котова, Лубнина, 1999, Помазкина, 2004).

Таблица 2.1

Формулы расчетов потоков азота

(Fried, Dean., 1952; Турчин, 1965; Помазкина, 1985, 2004; Помазкина, Котова, Лубнина, 1999, Помазкина, Котова и др., 2008; Сычев, Соколов и др., 2012)

№ п/п	Показатель	Формула
1.	Иммобилизованный / реимобилизованный N_c	$N_c = \frac{Na * ^{15}Nc}{^{15}Na}$
2.	Непроизводительные потери N_d	$N_d = \frac{Na * ^{15}Nd}{^{15}Na}$
3.	Минерализованный азот (М)	$M = N_a + N_b + N_c + N_d$
4.	Нетто-минерализованный (Н–М)	$H-M = N_a + N_b + N_d$
5.	Реимобилизованный (РИ)	$RI = M - H-M$

N_a – использованный азот растениями (вынос);
 N_c – иммобилизованный / реимобилизованный;
 N_d – непроизводительные потери;
 N_b – остаточный минеральный азот;
 M – минерализованный азот
 $H-M$ – нетто-минерализованный азот;
 RI – реимобилизованный азот.

Глава 3. Оценка эффективности применения биопрепаратов на яровых пшенице и ячмене в европейской части России

Применение биопрепаратов в сельском хозяйстве остается на низком уровне. Причина, по-видимому, кроется в недооценке практической значимости микроорганизмов в азотфиксации, недостаточной изученности многих физиолого-биохимических и генетических особенностей процесса азотфиксации (Тихонович, 1989).

Несмотря на имеющееся в настоящее время большое число работ по ассоциативной азотфиксации в агроценозах, до сих пор продолжают отсутствовать надежные количественные оценки размеров поступления фиксированного азота почвы в конкретных экологических условиях при использовании препаратов ассоциативных азотфиксаторов. Нет также единого мнения относительно влияния азотных удобрений на размеры ассоциативной азотфиксации.

Большинство проводимых исследований носят кратковременный характер – не более 3-х лет и преследуют цель дать оценку влияния препаратов ассоциативных диазотрофов на урожайность сельскохозяйственных культур, вынос азота с урожаем, определить концентрацию азота в растении в течение вегетации и урожая. Имеются попытки установить размеры ассоциативной азотфиксации в почвах (Кондаурова, 1997; Сологуб, 2005). В большей степени проводились исследования по установлению размеров несимбиотической азотфиксации в почвах балансовым методом. В длительных стационарных опытах при систематических наблюдениях за приходными и расходными статьями азотного баланса в почвах с определенной точностью может быть вычленено поступление связанного азота из атмосферы (Кудеяров, 1989). Так в работах сотрудников Ротамстедской опытной станции (Powlson, Jenkinson, 1987) (цитируется по Кудеярову, 1989), в опытах, проводимых с 1843 г., показано, что на варианте без внесения азота (PKMg) баланс азота складывался с положительным сальдо – за 115 лет в среднем 41 кг/га в год. В годы, когда в опыте на варианте с внесением азотных удобрений использовали метку ^{15}N , авторам (Powlson, Jenkinson, 1987) удалось рассчитать поступление в почву азота атмосферы – в среднем за год 47,6 кг/га в год при ежегодном внесении азота 144 кг/га. Для варианта без внесения азота его поступление из атмосферы составило 34,5–35,7 кг/га в год. В наших исследованиях применение метки ^{15}N с использованием модифицированного балансового метода позволило рассчитать количество ассоциативного азота, фиксированного диазотрофами в посевах яровой пшеницы и использованном культурными растениями: при применении биомассы горчицы в среднем 12 кг/га в год (колебания от 8 до 21 кг/га в год), аммиачной селитры – 10 кг/га в год (колебания от 7 до 17 кг/га в год), при совместном их применении – 8 кг/га в год (колебания от 2 до 14 кг/га в год) (см. главу 7).

Вместе с тем для практического использования при разработке рекомендаций производству вышеуказанных данных явно не достаточно. В связи с чем нами предпринята попытка обобщения результатов краткосрочных полевых опытов с целью установления количественных параметров эффективности применения ассоциативных азотфиксаторов при возделывании яровых зерновых культур (яровых пшеницы и ячменя).

Эффективность применения биопрепаратов на яровой пшенице. В полевых опытах с яровой пшеницей, проведенных в Европейской части России, установлено, что эффективность инокуляции семенного материала биопрепаратами ризосферных diaзотрофов (Ризоагрин, Флавобактерин) на фоне без N определяется типом почв. На черноземных почвах, отличающихся высоким уровнем естественного плодородия, средневзвешенная прибавка урожайности зерна от применения биопрепаратов составила 23%, соломы – 24% (табл. 3.1).

На серых лесных почвах положительное действие препаратов на основе ризосферных diaзотрофов проявилось в росте урожайности зерна на 14%, соломы – на 15%. Применение биопрепаратов ассоциативных азотфиксаторов при возделывании яровой пшеницы на дерново-подзолистых почвах, имеющих по сравнению черноземами и серыми лесными почвами более низкое содержание гумуса и обладающих невысокой микробиологической активностью, отмечено увеличением урожайности зерна на 13–18%, соломы – 6–18%.

Таблица 3.1

Прибавка урожайности зерна и массы соломы яровой пшеницы от инокуляции биопрепаратами ассоциативных микроорганизмов

Почва	Урожайность зерна, т/га	Масса соломы, т/га	Прибавка от инокуляции, т/га	
			зерно	солома
	P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀		P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП	
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	1,65	2,05	0,30	0,27
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	1,67	2,81	0,20	0,17
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	1,75	2,62	0,23	0,48
Серые лесные	1,97	2,48	0,27	0,36
Черноземы	2,43	3,26	0,57	0,79
Почва	N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀		N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП	
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	2,00	2,43	0,38	0,53
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	2,42	4,26	0,47	0,00
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	2,14	3,13	0,20	0,10
Серые лесные	2,22	2,80	0,28	0,32
Черноземы	2,70	3,76	0,35	0,46

Примечание: БП – биопрепараты, созданные на основе штаммов ассоциативных diaзотрофов – Ризоагрин и Флавобактерин (в этой и последующих таблицах этой главы).

Влияние биопрепаратов на зерновую продуктивность яровой пшеницы при применении невысокой дозы азотного удобрения (30 кг/га д.в.) проявляется наиболее сильно и устойчиво в лесолуговой (Нечерноземной) зоне на бедных гумусом дерново-подзолистых почвах в условиях достаточного обеспечения растений влагой – рост прибавки урожайности зерна на 10–20%. На серых лесных почвах рост прибавки урожайности

зерна составляет 12%, черноземах – 13% (Алферов, Чернова, Кожемяков, 2017).

Накопление сухой массы идет параллельно накоплению азота в растениях и в большей степени зависит от обеспеченности сельскохозяйственных культур этим биогенным элементом в период вегетации (Завалин, Соколов, 2016). Результаты обобщения материалов опытов на дерново-подзолистых суглинистых почвах показали, что накопление азота урожаем яровой пшеницы без применения азотного удобрения возрастает по мере роста окультуренности почвы, т.е. с увеличением содержания гумуса в ней (рис. 3):

$$Y = 23,354 x + 7,455, R = 0,656 \quad (4)$$

где Y – урожайность зерна яровой пшеницы, т/га; x – содержание гумуса (изменяется от 1,20 до 2,20%), %; R – коэффициент корреляции, $n = 13$, $t_r > t_r$.

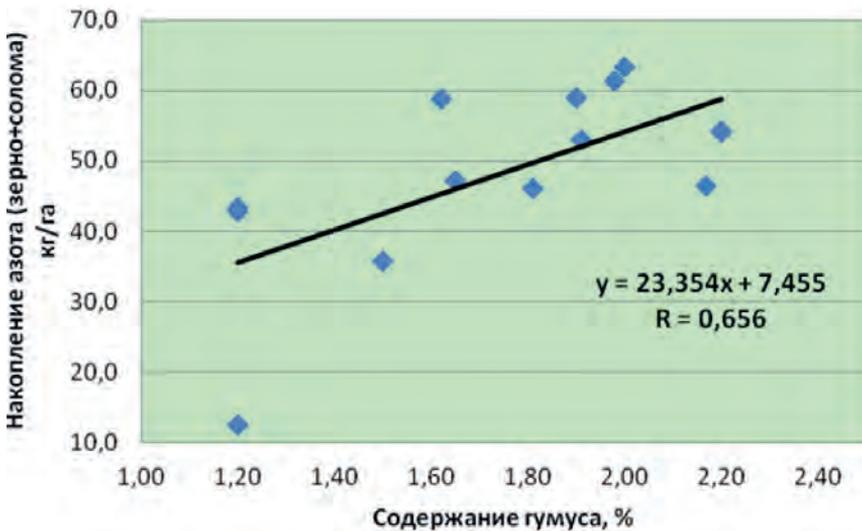


Рис. 3. Зависимость накопления азота в урожае яровой пшеницы (зерно+солома) (y) от содержания гумуса (x) на дерново-подзолистых почвах Европейской части России.

Рост накопления азота урожаем яровой пшеницы наблюдается от дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв к суглинистым, далее серым лесным и черноземам (табл. 3.2). Подобная ситуация происходит и при внесении «стартовой» дозы азотного удобрения. Инокуляция семян яровой пшеницы биопрепаратами ассоциативных diaзотрофов повышает накопление азота в растении, что отмечается на всех исследуемых типах почв: на дерново-подзолистых почвах увеличение составляет 13–20% (от легких к тяжелым по гранулометрическому составу почвам % возрастает), серых лесных – на 14%, черноземах – на 25%.

Эффективность использования азота растением может быть оценена по величине азотного индекса (доля азота зерна от общего его накопления в урожае) (Климашевский, 1991). При улучшении минерального питания рас-

тений за счет инокуляции семян биопрепаратом ассоциативных diaзотрофов масса побочной продукции (соломы) на дерново-подзолистых почвах возрастает меньше, чем масса зерна, что подтверждается азотным индексом, который возрастал с 0,72–0,74 до 0,75–0,77. Таким образом, биопрепараты ассоциативных азотфиксаторов на почвах с невысоким содержанием органического вещества способствуют росту зерновой продуктивности растений яровой пшеницы.

Таблица 3.2
Накопление азота в урожае яровой пшеницы и азотный индекс

Почва	Накопление N урожаем (зерно+солома), кг/га		Азотный индекс	
	$P_{30-90}K_{30-90}$	$P_{30-90}K_{30-90} + \text{БП}$	$P_{30-90}K_{30-90}$	$P_{30-90}K_{30-90} + \text{БП}$
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	32,8	37,1	0,74	0,77
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	43,1	51,7	0,72	0,75
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	48,0	58,0	0,74	0,75
Серые лесные	61,8	70,7	0,72	0,72
Черноземы	75,2	94,0	0,78	0,78
Почва	$N_{30}P_{30-90}K_{30-90}$	${}_{30}P_{30-90}K_{30-90} + \text{БП}$	$N_{30}P_{30-90}K_{30-90}$	$N_{30}P_{30-90}K_{30-90} + \text{БП}$
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	44,4	50,1	0,78	0,75
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	65,8	78,8	0,72	0,77
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	62,9	70,4	0,72	0,72
Серые лесные	70,6	74,5	0,72	0,72
Черноземы	87,0	101,1	0,76	0,76

На серых лесных и черноземных почвах по сравнению с дерново-подзолистыми почвами биопрепараты не оказывают существенного влияния на азотный индекс, что, по-видимому, связано с более высоким содержанием органического вещества в них и обеспеченностью азотом в период вегетации (Сиддики, 2001; Шотт, 2007).

Одним из основных показателей, определяющих пригодность зерна яровой пшеницы для хлебопечения, является содержание и качество белка (Завалин, 2005). Считается, что количество клейковинных белков в зерне пшеницы на 70% зависит от условий возделывания (плодородие почвы, агротехника, дозы и сроки внесения азотных удобрений и т.д.), а их качество в такой же мере определяется генотипом (сортовыми особенностями) (Павлов, 1967, 1984; Кретович, 1981, 1987; Конарев, 1980; Пасынков, 2004; Завалин, 2005; Пасынкова, 2013; Завалин, Соколов, 2018). Содержание белка в зерне яровой пшеницы является изменчивым признаком и в зависимости от условий выращивания может варьировать в очень широких пределах – от 8 до 25% (Павлов, 1984). При внесении фосфорных и калийных удобрений белковость зерна яровой пшеницы находилась в пределах 8,4–13,7 % и определялась плодородием почвы (табл. 3.3), которое определяется типом почв.

Таблица 3.3
Содержание сырого белка в зерне яровой пшеницы, %

Почва	Вариант	
	P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀	P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	8,4	8,6
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	11,3	10,8
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	12,5	13,0
Серые лесные	12,8	12,8
Черноземы	13,7	13,8
Почва	N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀	N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	9,8	9,4
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	11,6	11,2
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	13,2	13,3
Серые лесные	12,9	13,0
Черноземы	13,8	14,3

По содержанию белка в зерне яровой пшеницы в порядке убывания, почвы Европейской части России расположились следующим образом: черноземные почвы > серые лесные > дерново-подзолистые. В группе дерново-подзолистых почв белковость зерна яровой пшеницы уменьшалась в зависимости от гранулометрического состава от среднесуглинистых почв до песчаных и супеси. На фоне применения фосфорного и калийного удобрений содержание белка в зерне яровой пшеницы определяется запасами доступного азота почвы и связано с гумусированностью почвы.

Установленная зависимость содержания сырого белка в зерне яровой пшеницы от содержания гумуса на дерново-подзолистых почвах была сильной по величине и линейной по форме (рис. 4):

$$Y = 4,90x + 3,02, R = 0,73 \quad (5)$$

где Y – содержание сырого белка в зерне яровой пшеницы, %; x – содержание гумуса в пахотном слое почвы (изменяется от 1,20 до 2,20%), %; R – коэффициент корреляции; $n = 13$, $t_r > t_r$.

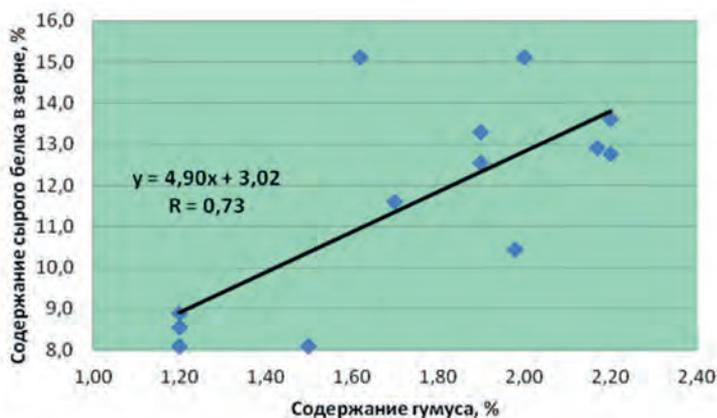


Рис. 4. Зависимость содержания в зерне яровой пшеницы сырого белка (Y) от содержания гумуса (x) на дерново-подзолистых почвах Европейской части России.

По мнению А.Н. Павлова (1967, 1984), синтез белка в зерне происходит как в результате вторичного использования (реутилизации) азотистых веществ, накопленных в растении до цветения, так и использования азота, поглощенного из почвы в период налива зерна. Доля их участия изменяется значительно в зависимости от наличия азота в питательной среде. При внесении азотного удобрения белковость зерна определяется дозой. Невысокие дозы усиливают рост растений, но концентрация азота в тканях не повышается и содержание белка не увеличивается (Завалин, 2003; Пасынкова, 2013). Эта закономерность проявляется и в проведенных опытах (табл. 3.1.3). Применение азотного удобрения в дозе 30 кг д.в. на 1 га почти на всех типах почв не оказывало существенного влияния на белковость зерна. Исключение составили дерново-подзолистые супесчаные и песчаные почвы, где применение азотного удобрения способствовало росту средневзвешенного содержания белка на 1,4%. Это связано с низким содержанием гумуса в почве (менее 1,5%) и обеспеченностью азотом.

Инокуляция семян яровой пшеницы биопрепаратами ассоциативных д-азотрофов не оказывала существенного влияния на белковость зерна. На отдельных почвенных разностях (дерново-подзолистые суглинистые и черноземные почвы) наблюдалась тенденция к росту данного показателя на вариантах, где высевали инокулированные семена.

Для расчета доз минеральных удобрений применяются различные методы (Державин, Литвак и др., 1988; Каюмов, 1989; Кулаковская, 1990; Ладонин, Крамаров и др., 1999; Личман, Марченко и др., 2004). Большинство из них базируется на определении нормативов выноса азота, фосфора и калия на получение единицы (т) основной продукции с соответствующим количеством побочной (Нормативы выноса..., 1991; Методическое руководство..., 2008; Рекомендации..., 2010), которые дифференцированы по предшественникам, почвенно-климатическим зонам страны с учетом повторяемости влагообеспеченных и засушливых лет. На основании нормативов обычно рассчитывается вынос элементов питания с урожаем, который учитывается при составлении баланса биогенных элементов в земледелии Российской Федерации (Сычев, Шафран, 2013).

Вынос такого биогенного элемента питания, как азот, для получения 1 т зерна с соответствующим количеством соломы определяется главным образом его накоплением в зерне и соломе, которая, как было показано выше в опытах, может изменяться при внесении минеральных удобрений под сельскохозяйственные культуры, а также использования средств биологизации (сидераты, биопрепараты).

В работе «Нормативы выноса...» (1991) определено, что нормативы выноса элементов минерального питания сельскохозяйственными культурами (на 1 т урожая) разработаны по единой методике и предназначены для расчета потребности в минеральных удобрениях балансовым методом и определения баланса азота, фосфора и калия в почве при оценке интенсивности земледелия, прогнозирования и изменения плодородия почв и целенаправленного его регулирования. В более поздних рекомендациях (Рекомендации..., 2010) установлено, что нормативы можно использовать для расчета доз минеральных удобрений на планируемый урожай сельскохозяйственных культур и определения потребности в минеральных удобрениях.

Для лесостепи Центрального района Нечерноземной зоны России (дерново-подзолистые и серые лесные почвы) на формирование 1 т зерна яровой пшеницы с соответствующим количеством побочной продукции нормативы выноса азота по обобщенным данным 14 опытов составляют 31,5 кг/т (Нормативы выноса..., 1991), при этом отношение побочной продукции к основной 1,5, или хозяйственный коэффициент в то время, когда проводили расчеты нормативов для яровой пшеницы, составлял 0,40; в Центрально-Черноземном районе (35 опытов) соответственно 31,1 кг/т, отношение побочной продукции к основной 1,7, $K_{хоз} = 0,37$; в Поволжском районе (78 опытов) соответственно 30,2 кг/т, отношение побочной продукции к основной 1,2, $K_{хоз} = 0,45$.

При обобщении данных полевых опытов, проведенных на дерново-подзолистых почвах, установлено, что вынос азота на получение 1 т зерна с соответствующим количеством соломы яровой пшеницы различался в зависимости от почвенной разности, применения удобрений и инокуляции (табл. 3.4). У яровой пшеницы в варианте РК-удобрений на дерново-подзолистой легко- и среднесуглинистой почвах вынос азота на получение 1 т зерна оказался примерно на 1/3 выше по сравнению с песчаными и супесчаными почвами. На серых лесных и черноземных почвах по сравнению с дерново-подзолистыми почвами вынос азота на получение 1 т зерна оказался на 14–59% выше. Такая же тенденция сохраняется и при применении азотного удобрения.

Инокуляция семян яровой пшеницы биопрепаратами ассоциативных динитрофоров способствует некоторому увеличению выноса азота с 1 т зерна и соответствующим количеством соломы – на дерново-подзолистых легко- и среднесуглинистых почвах рост составляет около 7%. На серых лесных и черноземных почвах изменений от инокуляции семян биопрепаратами не установлено.

Таблица 3.4
Вынос азота 1 т зерна яровой пшеницы, кг

Почва	Вынос азота 1 т зерна с учетом побочной продукции		Вынос азота 1 т зерна	
	$P_{30-90}K_{30-90}$	$P_{30-90}K_{30-90} + \text{БП}$	$P_{30-90}K_{30-90}$	$P_{30-90}K_{30-90} + \text{БП}$
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	19,8	19,3	14,6	14,9
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	25,9	27,7	18,7	20,8
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	27,5	29,4	20,3	22,0
Серые лесные	31,4	31,6	22,6	22,7
Черноземы	30,9	31,3	24,1	24,3
Почва	$N_{30} P_{30-90}K_{30-90}$	$N_{30} P_{30-90}K_{30-90} + \text{БП}$	$N_{30} P_{30-90}K_{30-90}$	$N_{30} P_{30-90}K_{30-90} + \text{БП}$
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	22,2	21,1	17,2	15,9
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	27,2	27,2	19,5	20,9
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	29,4	30,1	21,2	21,8
Серые лесные	31,9	31,9	22,7	22,9
Черноземы	32,2	33,1	24,3	25,1

Сравнение рассчитанных значений выноса азота 1 т зерна яровой пшеницы с соответствующим количеством соломы с принятыми нормативами («Нормативы выноса...», 1991) показывает, что при внесении фосфорного и калийного удобрений на дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах с содержанием органического вещества менее 1,5% вынос значительно меньше (19,8 против 31,5 кг N / т зерна). Это обусловлено невысоким количеством доступного азота в почве и связано со значительной реутилизацией азотистых веществ из вегетативных органов (Павлов, 1967, 1984, Пасынкова, 2013).

На дерново-подзолистых среднесуглинистых и тяжелосуглинистых почвах при внесении фосфорных и калийных удобрений вынос азота 1 т зерна яровой пшеницы с соответствующим количеством соломы составил соответственно на 18% и 13% ниже действующих нормативов. При внесении азотного удобрения разрыв снижался соответственно до 12 и 7%. Таким образом, на дерново-подзолистых почвах при определении нормативов выноса азота для яровой пшеницы необходимо учитывать содержание органического вещества и гранулометрический состав почвы.

На черноземных и серых лесных почвах Европейской части России рассчитанные значения выноса 1 т зерна яровой пшеницы с соответствующим количеством соломы не отличались от принятых нормативов на варианте с внесением РК-удобрений, а применение азотного удобрения в дозе 30 кг д.в. на 1 га увеличивало его только на черноземных почвах.

Итак, вынос азота растениями яровой пшеницы для получения 1 т зерна с соответствующим количеством соломы различался как по типам почв, так и по средствам химизации и биологизации (азотное удобрение и биопрепарат). В связи с этим, принимая определенную условность, средне-взвешенный норматив выноса азота на получение 1 т зерна с соответствующим количеством соломы для яровой пшеницы составляет по варианту РК-удобрений на дерново-подзолистых суглинистых почвах (Центральный район) 26,7 кг/т, серых лесных (Центральный район) 31,4 кг/т, черноземах (Центрально-Черноземный район) 30,9 кг/т; по фону с азотным удобрением и биопрепаратами: на дерново-подзолистых почвах (Центральный район) 28,7 кг/т, серых лесных (Центральный район) 31,9 кг/т, черноземах (Центрально-Черноземный район) 33,1 кг/т.

Несмотря на определенную условность расчетов по разностному методу, полученные данные позволяют судить о порядке величин фиксации азота ассоциативными диазотрофами (табл. 3.5). Размеры ассоциативной азотфиксации под яровой пшеницей на дерново-подзолистых суглинистых почвах в Европейской части России без применения азотных удобрений близки между собой и составляют около 20% от выноса, в абсолютных единицах это 8–10 кг/га в год. Несколько меньшие объемы фиксации азота, наблюдаемые на дерново-подзолистых песчаных почвах (13% от выноса), они по средне-взвешенным данным составляют 4,3 кг/га в год, что обусловлено более низким уровнем их естественного плодородия и снижением объемов азотфиксации в этих условиях (Завалин, 2005). Серые лесные почвы не значительно отличаются от дерново-подзолистых почв по размерам накопления ассоциативного азота.

На черноземных почвах установлена более высокая эффективность диазотрофов. Размеры ассоциативной азотфиксации от инокуляции биопрепаратами составили 12 кг/га в год от общего выноса азота с урожаем яровой пшеницы. Усиление деятельности диазотрофов на черноземах возможно связано с повышением количества доступного для микроорганизмов энергетического субстрата в виде гумуса, а также более высокой микробиологической активностью данного типа почв, особенно целлюлозоразлагающих микроорганизмов, обогащающих почву различными микробными метаболитами, легкодоступным углеродом (Гамзиков, 2013). Выявленное изменение размеров ассоциативной азотфиксации в почвах под яровой пшеницей согласуется с ранее установленной закономерностью – активность азотфиксации в почвах возрастает при переходе от северных почв к южным (Умаров, 1986). Применение минеральных азотных удобрений глубоко воздействует на все процессы трансформации почвенного азота, изменяет равновесие между минерализацией и иммобилизацией азота, а также влияет на деятельность почвенных микроорганизмов и эффективность биопрепаратов (Трепачев, 1999; Завалин, Соколов, 2016). При применении азотных удобрений на дерново-подзолистых почвах легкого гранулометрического состава интенсивность ассоциативной азотфиксации не снижается. На дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах происходит уменьшение доли ассоциативного азота в выносе с урожаем при применении азотного удобрения с 20% до 12%. Это объясняется тем, что супесчаные и песчаные почвы обладают низким уровнем естественного плодородия, невысокой микробиологической активностью, и внесение минеральных удобрений в дозах, не превышающих физиологических потребностей растений, не снижает интенсивность несимбиотической азотфиксации (Трепачев, 1999; Шотт, 2007).

Таблица 3.5
Количество биологического азота, вовлекаемое в результате ассоциативной азотфиксации в посевах яровой пшеницы

Почва	Ассоциативный азот	
	кг/га	% от выноса
P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП		
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	4,3	13,2
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	8,6	20,0
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	10,0	20,9
Серые лесные	8,9	14,5
Черноземы	12,0	18,4
N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП		
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	5,7	12,8
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	13,0	19,8
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	7,5	11,8
Серые лесные	9,1	12,9
Черноземы	12,3	17,2

Вместе с тем необходимо отметить, что на черноземах при совместном использовании биопрепаратов и азотного удобрения количественные параметры ассоциативной азотфиксации возрастают незначительно, однако относительная доля в выносе уменьшается. На серых лесных почвах при внесении удобрения количество азота, накопленное за счет ассоциативной азотфиксации, практически не изменяется.

Важным показателем в системе критериев, характеризующих режим азотного питания растений в онтогенезе и определяющих эффективность применяемых удобрений, является величина коэффициента использования азота удобрениями растениями (Завалин, Соколов, 2016). По результатам опытов, проведенных на яровой пшенице почти на всех типах почв при инокуляции семян биопрепаратами, коэффициент использования азота (КИ) минеральных удобрений возрастает (табл. 3.6). Наиболее значительное его увеличение наблюдается на черноземных почвах – в 1,6 раза. На дерново-подзолистых почвах рост КИ азота увеличивается в 1,1–1,2 раза.

Таблица 3.6
Коэффициент использования растениями
азота минеральных удобрений, %

Почва	Без инокуляции	Инокуляция
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	36	39
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	50	60
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	43	46
Серые лесные	29	31
Черноземы	28	46

Повышение эффективности применения удобрений в агротехнологиях выращивания сельскохозяйственных культур является важным аспектом совершенствования систем земледелия и рационального использования материально-технических средств (Сычев, Завалин, Шафран и др., 2009). Эффективность использования удобрений, наряду с другими факторами, оценивают по их окупаемости прибавкой урожая возделываемых культур. Расчеты окупаемости азота удобрения на яровой пшенице показали, что она изменяется по типам почв (табл. 3.7). Наибольшая окупаемость азотного удобрения отмечается на дерново-подзолистых почвах, далее в порядке убывания следуют серые лесные почвы и черноземы. Инокуляция биопрепаратами ассоциативных диазотрофов способствует лучшему усвоению азота удобрения. На черноземах окупаемость азота минерального удобрения возрастает в 2,3 раза, на дерново-подзолистых почвах – в 1,5–2,1, на серых лесных – в 2,1 раза.

Таблица 3.7

Окупаемость азота минерального удобрения при возделывании яровой пшеницы, кг зерна/кг N д.в.

Почва	Без инокуляции	Инокуляция
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	11,7	24,3
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	25,0	40,7
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	13,0	19,7
Серые лесные	8,3	17,7
Черноземы	9,0	20,7

Таким образом, применение биопрепаратов ассоциативных азотфиксаторов в агротехнологиях возделывания яровой пшеницы способствует увеличению урожайности основной и побочной продукции, повышает коэффициент использования азота минеральных удобрений и его окупаемости зерном.

Эффективность применения биопрепаратов на яровом ячмене. По сравнению с яровой пшеницей яровой ячмень имеет более короткий период вегетации, что отражается на питании растений; ячмень более требователен к почвенным условиям (Неттевич, Аниканова, Романова, 1981; Беляков, 1990; Штырхунов, Останина и др., 2010). В полевых опытах с яровым ячменем, проведенных в Европейской части России, установлено, что эффективность инокуляции семенного материала биопрепаратами ризосферных diaзотрофов (Ризоагрин, Флавобактерин) на фоне без N-удобрений определяется типом почв. На черноземных почвах, отличающихся высоким уровнем естественного плодородия, средневзвешенная прибавка урожайности зерна от применения биопрепаратов составила 0,30 т/га (+12%), соломы 0,64 т/га (+21%) (табл. 3.8). На серых лесных почвах положительное действие препаратов на основе ризосферных diaзотрофов проявилось в росте урожайности зерна на 0,23 т/га (+11%) и сбора соломы – на 0,28 т/га (+12%). Применение биопрепаратов ассоциативных азотфиксаторов при возделывании ячменя на дерново-подзолистых почвах, имеющих по сравнению черноземными почвами более низкое содержание гумуса и обладающих невысокой микробиологической активностью, отмечено увеличением урожайности зерна на 0,19–0,26 т/га (+13...19%), соломы на 0,21–0,37 т/га (+14...17%).

Влияние биопрепаратов на зерновую продуктивность ячменя при применении невысокой дозы азотного удобрения (30 кг/га д.в.) проявляется также, как и на яровой пшенице, – наиболее сильно и устойчиво в лесолуговой (Нечерноземной) зоне на бедных гумусом дерново-подзолистых почвах в условиях достаточного обеспечения растений влагой; рост прибавки урожайности зерна достигал 0,28–0,47 т/га (+14...23%). На серых лесных почвах и черноземах прибавки зерна от биопрепарата составили соответственно 0,20 и 0,28 т/га (она оказалась примерно такой же, как в варианте РК).

Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы

Таблица 3.8
Коэффициент использования растениями
азота минеральных удобрений, %

Почва	Урожайность зерна	Масса соломы	Прибавка от инокуляции	
			зерно	солома
	$P_{30-90}K_{30-90}$		$P_{30-90}K_{30-90} + \text{БП}$	
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	1,02	1,30	0,19	0,21
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	1,54	2,18	0,26	0,37
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	1,77	2,12	0,23	0,29
Серые лесные	2,10	2,34	0,23	0,28
Черноземы	2,45	3,04	0,30	0,64
Почва	$N_{30}P_{30-90}K_{30-90}$		$N_{30}P_{30-90}K_{30-90} + \text{БП}$	
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	1,61	1,90	0,28	0,36
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	1,99	2,72	0,47	0,56
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	2,18	2,65	0,31	0,45
Серые лесные	2,32	2,62	0,20	0,25
Черноземы	2,66	3,37	0,28	0,67

Почвенные ресурсы России весьма разнообразны, амплитуда колебаний даже в одном регионе достаточно велика, что сказывается на размерах потребления элементов питания (в том числе и азота) возделываемыми культурами. Размеры потребления азота, в свою очередь, определяют ход обмена веществ, накопление азота в урожае, а также величину и качество самого урожая, выражаемые в эффективности применения удобрений (Сычев, Соколов, Шмырева, 2009, Сычев, Шафран, 2012; Завалин, Соколов, 2016).

По мнению А.А. Завалина, О.А. Соколова (2016), потребление и накопление азота растениями, а также использование азота удобрений находится в сопряженной зависимости от плодородия почвы, поэтому важно выяснить, какое влияние оказывает тип почвы на вышеуказанные показатели. Расчет накопления азота в растениях ячменя показал, что он в большей степени зависит от обеспеченности сельскохозяйственных культур этим элементом (табл. 3.9). Ячмень предъявляет высокие требования к плодородию почвы по сравнению с другими зерновыми культурами. Под него предпочтительны хорошо аэрируемые, высокоплодородные глинистые и суглинистые почвы (Беляков, 1990; Хусайнов, 2006). Возделывание ячменя на дерново-подзолистых почвах, природно характеризующихся низким плодородием (невысоким содержанием гумуса), сопровождалось более низким накоплением азота в урожае зерна и массе соломы – от 23,6 до 43,1 кг/га. Минимальное накопление отмечено на песчаных и супесчаных почвах (в варианте внесения РК-удобрений – 23,6 кг/га), выше на легкосуглинистых (39,8 кг/га) и максимальное на среднесуглинистых почвах – 43,1 кг/га. По сравнению с дерново-подзолистыми среднесуглинистыми почвами серые лесные и черноземные почвы обладают более высоким уровнем плодородия, и, как следствие, растения ячменя накапливали больше азота соответственно в 1,3 и 1,7 раза.

Таблица 3.9
Накопление азота в урожае ярового ячменя и азотный индекс

Почва	Накопление N урожаем (зерно+солома), кг/га		Азотный индекс	
	P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀	P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП	P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀	P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	23,6	28,9	0,71	0,69
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	39,8	49,2	0,68	0,67
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	43,1	52,2	0,71	0,70
Серые лесные	56,3	63,3	0,68	0,68
Черноземы	71,5	83,8	0,71	0,71
Почва	N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀	N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП	N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀	N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	38,9	47,3	0,66	0,66
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	58,8	73,7	0,68	0,68
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	62,0	74,8	0,69	0,68
Серые лесные	66,8	73,3	0,67	0,68
Черноземы	84,3	93,9	0,72	0,71

По обобщению проф. Т.И. Ивановой (1989), ячмень повсеместно в Нечерноземной зоне России хорошо отзывается на внесение удобрений. Использование минеральных удобрений обеспечивает рост сбора зерна на 0,63–1,92 т/га. На почвах в этой зоне, как правило, в первом минимуме находится азот, поэтому значительная роль в формировании урожайности ячменя здесь принадлежит азотным удобрениям, прибавки от этого элемента достигают 0,51–1,70 т/га, тогда как от фосфорных и калийных удобрений урожайность возрастала только на 0,10–0,47 т/га (Волков, 2003). Положительное действие азотных удобрений проявляется также на серых лесных и черноземных почвах (Байрамов, 2001; Калашников, 2005; Хусайнов, 2006; Никитин, 2015, 2017). В нашем случае обобщение результатов полевых опытов показало, что применение минимальной дозы азота (30 кг/га по д.в.) под ячмень приводит к росту накопления биомассой растений (зерно+солома) этого элемента в большей степени на дерново-подзолистых почвах (в зависимости от гранулометрического состава – от 1,4 до 1,6 раза), чем на серых лесных и черноземных почвах – в 1,2 раза.

Важным вопросом в исследовании является сравнение эффективности влияния различных источников азота на его накопление урожаем основной и побочной продукции. Инокуляция семян ярового ячменя биопрепаратами ассоциативных diaзотрофов способствует увеличению накопления азота в урожае. На дерново-подзолистых почвах рост накопления азота биомассой растений (зерно+солома) ячменя составил 21 – 24%, серых лесных почвах – 12%, черноземных почвах – 17%. Как видно из данных таблицы 3.9, эффект от инокуляции семян биопрепаратами меньше, чем от применения 30 кг/га азотного удобрения.

Действие биопрепаратов проявляется и при внесении минеральных азотных удобрений. Обобщенные данные микрополевых опытов показывают,

что эффект от инокуляции семян ячменя биопрепаратами diaзотрофов наблюдался на всех исследуемых типах почв. На дерново-подзолистых он составляет 21–25%, серых лесных – 10%, черноземных почвах – 11%.

Другим показателем, по которому возможно оценить эффективность агротехнического приема, является азотный индекс. Расчет азотного индекса показал, что применение биопрепаратов ассоциативных diaзотрофов не влияет на его величину в посевах ярового ячменя на изученных типах почв.

Ячмень считается универсальной культурой, имеющей большое кормовое, продовольственное и техническое значение. Его назначение определяется качеством зерна (содержание и качества белка, крахмала). Содержание сырого белка в зерне зерновых культур является изменчивым признаком и, в зависимости от условий выращивания, может варьировать в очень широких пределах. Особое значение в накоплении белка в зерне зерновых культур принадлежит обеспеченности растений азотом (Павлов, 1984; Созинов, Хохлов, Попереля, 1976). В отсутствие применения азотных удобрений белковость зерна ячменя находилась в пределах 9,3 – 11,8 % и определялась плодородием почвы (табл. 3.10), которое зависит от типа почв. По содержанию сырого белка в зерне ячменя в порядке убывания, почвы Европейской части России располагаются следующим образом: черноземные почвы > серые лесные > дерново-подзолистые. В группе дерново-подзолистых почв белковость зерна ячменя уменьшалась в зависимости от гранулометрического состава от среднесуглинистых почв до песчаных и супеси. На фоне применения только фосфорных и калийных удобрений содержание белка в зерне ячменя определяется запасами доступного азота почвы и связано с гумусированностью почвы.

Таблица 3.10
Содержание сырого белка в зерне ярового ячменя, %

Почва	Вариант	
	P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀	P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	9,3	9,4
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	9,9	10,4
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	10,0	10,4
Серые лесные	10,4	10,5
Черноземы	11,8	12,3
Почва	N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀	N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	9,1	9,4
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	11,2	11,6
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	11,5	11,6
Серые лесные	11,0	11,3
Черноземы	13,0	12,9

Установленная зависимость содержания сырого белка в зерне ячменя от

содержания гумуса на дерново-подзолистых почвах являлась средней по величине и криволинейной по форме (рис. 5):

$$Y = -1,79x^2 + 9,19x + 0,07, \quad \eta_{yx} = 0,70, \quad (6)$$

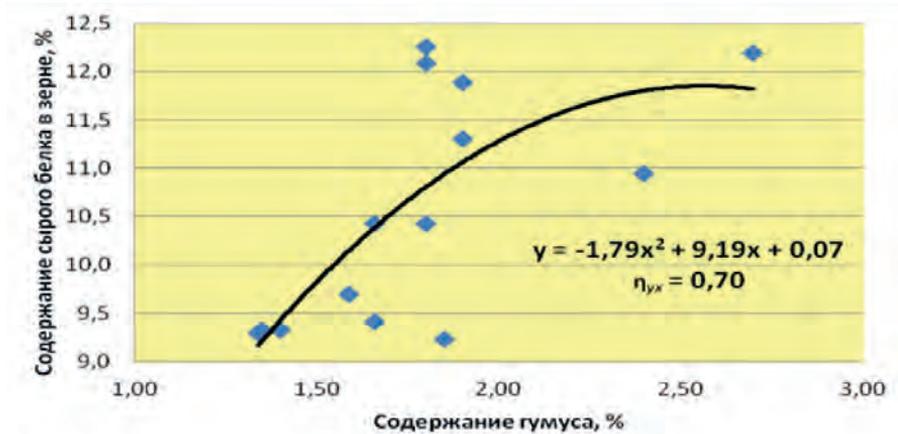


Рис. 5. Зависимость содержания в зерне ярового ячменя сырого белка (Y) от содержания гумуса (x) в дерново-подзолистых почвах Европейской части России.

где Y – содержание сырого белка в зерне ярового ячменя, %; x – содержание гумуса в пахотном слое почвы, % (изменяется от 1,34 до 2,70%); η_{yx} – коэффициент множественной корреляции; n = 14, $t_{\eta} > t_r$.

Это, по-видимому, связано с формами азота, входящими в состав гумуса. По мнению Е.В. Руделева (1992), дерново-подзолистые почвы обладают низким уровнем естественного плодородия и отличаются от черноземов не только по абсолютному содержанию органического азота, но и по его фракционному составу (фульватный тип гумуса). Для почв фульватного типа с преимущественным содержанием азота в группе фульвокислот характерно накопление азота в относительно легкогидролизуемой части почвенного гумуса, что обуславливает его мобильность в цикле внутрпочвенных превращений азота по сравнению с черноземами и, как следствие, влияние на обеспеченность растений азотом.

Применение 30 кг/га д.в. азотного удобрения способствовало росту содержания сырого белка только на черноземных почвах; на дерново-подзолистых и серых лесных отмечается только тенденция в повышении белковости зерна. Это связано со слабой минерализацией почвенного азота при низкой дозе применения азотного удобрения и сроками его внесения. На зерновых культурах существенное изменение белковости зерна наблюдается при дозе N90 и при проведении поздних азотных подкормок (фаза цветения) (Неттевич, Аниканова, Романова, 1981; Богачев, 2000; Ваулин, 2013).

Инокуляция семян ячменя биопрепаратами ассоциативных diaзотрофов не оказывала существенного влияния на белковость зерна. На отдельных почвенных разностях (дерново-подзолистые суглинистые и черноземные почвы) наблюдалась тенденция к росту содержания белка на вариантах, где

высевали инокулированные семена и только при применении РК-удобрений.

Нормативы выноса азота для ячменя, так же как и для яровой пшеницы, разработаны более 25 лет назад и учитывали особенность сортов того времени (создавались сорта, зерно которых предназначалось для использования на кормовые и продовольственные цели). В 1991 году для лесостепи Центрального района Нечерноземной зоны России (дерново-подзолистые и серые лесные почвы) на формирование 1 т зерна ярового ячменя с соответствующим количеством побочной продукции нормативы выноса азота по обобщенным данным 257 опытов составляли 27,8 кг/т (Нормативы выноса..., 1991), при этом отношение побочной продукции к основной 1,2, или хозяйственный коэффициент в то время, когда проводили расчеты нормативов для ярового ячменя, составлял 0,45; в лесолуговой зоне Волго-Вятского района (155 опытов) соответственно 31,8 кг/т, отношение побочной продукции к основной 1,4, $K_{хоз} = 0,42$; в целом Волго-Вятского района (103 опыта) соответственно 25,7 кг/т, отношение побочной продукции к основной 1,1, $K_{хоз} = 0,48$.

При обобщении данных полевых опытов с биопрепаратами, проведенных на дерново-подзолистых почвах, установлено, что вынос азота 1 т зерна с соответствующим количеством соломы ярового ячменя различался в зависимости от почвенной разности, применения удобрений и инокуляции семян (табл. 3.11). В отличие от яровой пшеницы эти различия менее выражены. В варианте РК-удобрений на дерново-подзолистой легко- и среднесуглинистой почвах вынос азота 1 т зерна ячменя с учетом побочной продукции всего на 6–11% превосходил значения, установленные ранее для песчаных и супесчаных почв. Различия между серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами оставались также не столь значительными, как для яровой пшеницы (вынос азота 1 т зерна ячменя с учетом побочной продукции были на серых лесных почвах всего на 4–16% выше). Более высокие значения выноса характерны для черноземных почв. По сравнению с дерново-подзолистыми почвами вынос в 1,1 – 1,3 раза выше. Улучшение условий азотного питания при внесении азотного удобрения повышает концентрацию азота в вегетативных органах и количество азота в растении, приходящееся на единицу массы зерна (Павлов, 1984). Как следствие, рост выноса азота: на дерново-подзолистых – на 5–16%, серых лесных – на 8%, черноземных почвах – на 9%.

Таблица 3.11
Вынос азота 1 т зерна ярового ячменя, кг

Почва	Вынос азота 1 т зерна с учетом побочной продукции		Вынос азота 1 т зерна	
	$P_{30-90}K_{30-90}$	$P_{30-90}K_{30-90} + \text{БП}$	$P_{30-90}K_{30-90}$	$P_{30-90}K_{30-90} + \text{БП}$
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	23,1	23,9	16,4	16,4
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	25,8	27,3	17,6	18,4
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	24,4	26,2	17,3	18,3
Серые лесные	26,8	27,2	18,2	18,5
Черноземы	29,2	30,5	20,8	21,7

Почва	N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀	N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП	N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀	N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	24,2	25,0	16,0	16,5
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	29,5	30,0	20,1	20,4
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	28,4	30,8	19,6	20,9
Серые лесные	28,8	29,1	19,3	19,8
Черноземы	31,7	31,9	21,7	22,8

При инокуляции семян ярового ячменя биопрепаратами ассоциативных diaзотрофов отмечается только положительная тенденция в росте выноса 1 т зерна с соответствующим количеством соломы: на дерново-подзолистых почвах на 3–7%, черноземных почвах на 4%. В то же время на серых лесных почвах изменений от инокуляции семян биопрепаратами не установлено. Итак, значения выноса азота ячменя 1 т зерна с соответствующим количеством соломы различались как по типам почв, так и по средствам химизации и биологизации (азотное удобрение и биопрепарат). В связи с этим, принимая определенную условность, средневзвешенный норматив выноса азота 1 т зерна с соответствующим количеством соломы для ячменя составляет по варианту РК–удобрений на дерново-подзолистых почвах (Центральный район) 24,4 кг/т, серых лесных (Центральный район) 26,8 кг/т, черноземах (Волго-Вятский район) 29,2 кг/т; по фону с азотным удобрением и биопрепаратами: на дерново-подзолистых почвах (Центральный район) 28,6 кг/т, серых лесных (Центральный район) 29,1 кг/т, черноземах (Волго-Вятский район) 31,9 кг/т.

Расчеты с использованием разностного метода (Завалин, 2005) с определенной долей условности позволяют судить о порядке величин фиксации азота ассоциативными diaзотрофами (табл. 3.12). Ассоциативная азотфиксация под яровым ячменем на дерново-подзолистых суглинистых почвах в Европейской части России без применения азотных удобрений близки между собой и составляют около 17% от выноса, в абсолютных единицах это 9–9,5 кг/га в год. Несколько меньшие размеры фиксации азота, наблюдаемые на дерново-подзолистых песчаных почвах (13% от выноса), они по средневзвешенным данным составляют 6,6 кг/га в год, что обусловлено более низким уровнем их естественного плодородия. Серые лесные почвы не значительно отличаются от дерново-подзолистых почв по размерам накопления ассоциативного азота.

На черноземных почвах установлена более высокая эффективность diaзотрофов. Размеры ассоциативной азотфиксации от инокуляции биопрепаратами составили 11,6 кг/га в год или 14,5% от выноса с урожаем ячменя. Усиление деятельности diaзотрофов на черноземах, по-видимому, связано с повышением количества доступного для микроорганизмов энергетического субстрата в виде гумуса, а также более высокой микробиологической активностью данного типа почв, особенно целлюлозоразлагающих микроорганизмов, обогащающих почву различными микробными метаболитами (Гамзиков, 2013).

На черноземах и серых лесных почвах при совместном использовании

Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы

биопрепаратов и азотного удобрения количественные параметры ассоциативной азотфиксации несколько возрастают, однако относительная доля в выносе уменьшается.

По результатам опытов, проведенных на яровом ячмене, почти на всех типах почв при инокуляции семян биопрепаратами коэффициент использования азота (КИ) минеральных удобрений возрастает (табл. 3.13). Наиболее значительное его увеличение наблюдается на дерново-подзолистых почвах – в 1,2–1,3 раза. На черноземных и серых лесных почвах рост КИ азота увеличивается соответственно в 1,2 и 1,3 раза.

Расчеты окупаемости азота удобрения на яровом ячмене показали, что она изменяется по типам почв (табл. 3.14). Максимальная окупаемость азотного удобрения получена на дерново-подзолистых почвах (14–20 кг зерна), на серых лесных почвах и черноземах меньше примерно в 2–3 раза и составляет соответственно 7,3 и 7,0 кг зерна.

Таблица 3.12
Размеры ассоциативной азотфиксации в посевах ярового ячменя

Почва	Ассоциативный азот	
	кг/га	% от выноса
P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП		
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	6,6	12,8
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	9,1	16,9
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	9,5	16,0
Серые лесные	10,8	15,5
Черноземы	11,6	14,5
N ₃₀ P ₃₀₋₉₀ K ₃₀₋₉₀ + БП		
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	7,4	12,3
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	10,4	16,1
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	10,4	14,9
Серые лесные	10,7	11,8
Черноземы	13,4	14,3

Таблица 3.13
Коэффициент использования азота из минеральных удобрений
яровым ячменем, %

Почва	Без инокуляции	Инокуляция
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	39	46
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	42	56
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	49	58
Серые лесные	39	52
Черноземы	31	36

Инокуляция биопрепаратами ассоциативных diaзотрофов способствует лучшему усвоению азота удобрения. На черноземных почвах окупаемость азота минерального удобрения возрастает в 2,3 раза, на дерново-подзолистых почвах – в 1,5–2,0 раза, на серых лесных – в 1,9 раза.

Таблица 3.14

Окупаемость азота минерального удобрения при возделывании ячменя, кг зерна/кг N д.в.

Почва	Без инокуляции	Инокуляция
Дерново-подзолистые песчаные, супесчаные	19,7	29,0
Дерново-подзолистые легкосуглинистые	15,0	30,7
Дерново-подзолистые среднесуглинистые	13,7	24,0
Серые лесные	7,3	14,0
Черноземы	7,0	16,3

Таким образом, действие инокуляции семян биопрепаратами ассоциативных азотфиксаторов (Ризоагрин и Флавобактерин) при возделывании яровой пшеницы определяется уровнем естественного плодородия, на дерново-подзолистых почвах в зависимости от гранулометрического состава выражается в виде прибавки урожайности зерна на 0,20–0,30 т/га, серых лесных почвах – 0,27 т/га и черноземах – 0,57 т/га на фоне применения РК-удобрений. На дерново-подзолистой почве в варианте применения полного минерального удобрения за счет улучшения условий азотного питания от инокуляции урожайность зерна яровой пшеницы увеличивается на 0,20–0,47 т/га, в то время как на других типах почв европейской части России составляет на серых лесных почвах – на 0,28 т/га, черноземах – на 0,35 т/га.

Размеры ассоциативной азотфиксации, определенные разностным методом, в посевах яровой пшеницы от инокуляции семян биопрепаратами на дерново-подзолистых почвах составляют 4,3–10,0 кг/га, на серых лесных – 8,9 кг/га и черноземах – 12,0 кг/га по фону применения РК-удобрений. Внесение азотного удобрения в дозе 30 кг д.в. / га на дерново-подзолистых почвах способствует увеличению использования фиксированного ассоциативного азота до 5,7–13,0 кг/га.

Коэффициент использования азота минеральных удобрений яровой пшеницей при инокуляции семян Ризоагрином и Флавобактерином существенно возрастает на дерново-подзолистых почвах с 36–50% до 39–60% и черноземах – с 28 до 46%. На серых лесных почвах наблюдается положительная тенденция роста КИ из азотного удобрения.

Инокуляция семян биопрепаратами ассоциативных diaзотрофов способствует повышению окупаемости азота минерального удобрения в посевах яровой пшеницы: на черноземах в 2,3 раза, на дерново-подзолистых почвах – в 1,5–2,1, на серых лесных – в 2,1 раза.

Прибавки урожайности зерна ячменя от инокуляции семян

биопрепаратами составляют на дерново-подзолистых почвах 0,23–0,26 т/га, серых лесных почвах – 0,29 т/га и черноземах – 0,37 т/га на фоне применения РК-удобрений. На фоне полного минерального удобрения – соответственно на 0,20–0,47 т/га.

Дополнительное использование азота ассоциативной азотфиксации в посевах ярового ячменя от инокуляции биопрепаратами на дерново-подзолистых почвах составляют 6,6–9,5 кг/га, на серых лесных – 10,8 кг/га и черноземах – 11,6 кг/га по фону применения РК-удобрений. При низком уровне естественного плодородия на дерново-подзолистых почвах внесение азотного удобрения в дозе 30 кг д.в. / га способствует увеличению использования фиксированного ассоциативного азота на 9–14%.

Коэффициент использования азота минеральных удобрений яровым ячменем при инокуляции семян Ризоагрином и Флавобактерином существенно возрастает на дерново-подзолистых почвах с 39–49% до 46–58%, серых лесных почвах – с 39 до 52% и черноземах – с 31 до 36%.

Инокуляция семян биопрепаратами ассоциативных диазотрофов способствует повышению окупаемости азота минерального удобрения в посевах ячменя: на черноземах в 2,4 раза, на дерново-подзолистых почвах – в 1,6–2,0 раза, на серых лесных почвах – в 1,8 раза.

Содержание белка в зерне зерновых культур является изменчивым признаком и, в зависимости от условий выращивания варьирует в широких пределах. В отсутствие применения азотных удобрений белковость зерна яровой пшеницы и ячменя находилась в пределах соответственно 8,4 – 13,7% и 9,3 – 11,8 % и определялась плодородием почвы.

По содержанию белка в зерне яровой пшеницы и ячменя в порядке убывания почвы Европейской части России расположились следующим образом: черноземные почвы > серые лесные > дерново-подзолистые. В группе дерново-подзолистых почв белковость зерна уменьшалась в зависимости от гранулометрического состава от среднесуглинистых почв до песчаных и супеси.

Установленная зависимость содержания белка в зерне для яровой пшеницы от содержания гумуса на дерново-подзолистых почвах являлась сильной по величине и линейной по форме ($y = 4,90x + 3,02$, $R = 0,73$, при $n = 13$), для ячменя – средняя по величине и криволинейная по форме ($y = -1,79x^2 + 9,19x + 0,07$, $\eta_{yx} = 0,70$, при $n = 14$).

Вынос азота 1 т зерна яровой пшеницы с соответствующим количеством соломы составляет на дерново-подзолистых суглинистых почвах (Центральный район) 26,7 кг/т, что меньше ранее установленных значений. На серых лесных (Центральный район) 31,4 кг/т, черноземах (Центрально-Черноземный район) 30,9 кг/т. При дополнительном использовании средств химизации (азотное удобрение) и биологизации (биопрепараты) вынос азота повышается на дерново-подзолистых почвах (Центральный район) – до 28,7 кг/т, серых лесных (Центральный район) – до 31,9 кг/т, черноземах (Центрально-Черноземный район) – до 33,1 кг/т.

У ячменя вынос азота по сравнению с яровой пшеницей несколько меньше. На фоне внесения РК-удобрений вынос азота составляет: на дерново-подзолистых почвах (Центральный район) 24,4 кг/т, серых лесных

(Центральный район) 26,8 кг/т, черноземах (Волго-Вятский район) 29,2 кг/т. При использовании средств химизации (азотное удобрение) и биологизации (биопрепараты) вынос азота также повышается: на дерново-подзолистых почвах (Центральный район) – до 28,6 кг/т, серых лесных (Центральный район) – до 29,1 кг/т, черноземах (Волго-Вятский район) – до 31,9 кг/т.

Глава 4. Эффективность использования биопрепаратов и азотных удобрений на яровой пшенице и ячмене

В XXI веке одной из основных задач в сельскохозяйственном производстве является получение стабильных, экономически оправданных урожаев, которую невозможно решить без использования современных технологий возделывания сельскохозяйственных культур. Находясь в системном взаимодействии, главные элементы агротехнологий имеют общие функции воздействия на факторы, определяющие продуктивность земледелия. В одних случаях та или иная функция может быть усилена соответствующим выбором севооборота, в других – системой обработки почвы или защиты растений. При этом важнейшую роль играет система удобрения (Прошкин, 2012). Удобрения оказывают значительное влияние не только на производительность земельных угодий, но и на агроэкологическое состояние земель. Без применения интегральной системы удобрений невозможно освоение в сельскохозяйственном производстве других систем – почвозащитных обработок почвы, оптимальных севооборотов, защиты растений от болезней и вредителей. Также не представляется возможным получение высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур определенного качества. Одним из важных условий рационального использования удобрений является их применение с учетом наиболее важных свойств почвы, погодных условий, которые оказывают различное положительное или дестабилизирующее влияние на эффективность удобрений (Прянишников, 1931; Авдонин, 1965; Кулаковская, 1987, 1990; Семенов, 1992; Сычев, Шафран, 2013; Гамзиков, 2013; Шафран, Сычев, Кондрашов, 2013; Шафран, 2014). Давая оценку роли отдельных факторов почвенного плодородия и погодных условий в продукционном процессе сельскохозяйственных растений, возникает необходимость учета их взаимодействия, которое в значительной мере определяет формирование урожая (Кулаковская, 1990; Кореньков, 1999; Семенов, 1992; Прошкин, Авдеев, 1994; Шафран, Прошкин, 2008). Потребность в такого рода исследованиях обосновывается тем, что при оптимизации условий минерального питания отмечается прирост урожайности сельскохозяйственных культур (Иванова, 1988, 1989; Кулаковская, 1990; Стребков, 1989; Семенов, 1992; Шафран, 1995).

По мнению В.А. Прошкина (2012), информацию о влиянии агрохимических свойств почвы, доз удобрений на продуктивность сельскохозяйственных культур достаточно полно демонстрируют структурные взаимосвязи в

системе почва–удобрения–растение. В этом случае анализ изменений оптимума одних свойств почвы при вариации других обеспечивает возможность объективно оценить зависимость урожайности сельскохозяйственных культур от различных сочетаний агрохимических свойств почвы и доз удобрений. Поэтому оптимальные показатели содержания, например, подвижных форм фосфора и калия в почве необходимо постоянно уточнять с учетом динамики их содержания в почве.

Реальное представление о действии комплекса агрохимических свойств почвы, доз удобрений и метеорологических условий на результативный признак можно получить на основе моделирования их взаимосвязей с использованием системного подхода в оценке наиболее перспективных комбинаций сочетания свойств почвы, удобрений и погодных условий, которые обеспечивают максимальный прирост урожайности сельскохозяйственных культур (Иванова, 1988; Кулаковская, 1990; Литвак, 1990; Войтович, 1997; Рашкович, 1995; Прошкин, 2010, 2011; 2012).

Исследования, устанавливающие связь между количеством внесенных удобрений, уровнем плодородия почвы и другими факторами роста и развития растений, прямо или косвенно влияющими на прирост урожайности сельскохозяйственных культур, проводились во второй половине XX века и начале XXI века и проводятся сейчас в России и за рубежом (Иванова, 1988; Кулаковская, 1990; Литвак, 1990; Стребков, 1989; Войтович, 1997; Рашкович, 1995; Гамзиков, 2013; Шафран, Прошкин, 2008; Шафран, Прошкин и др., 2010; Прошкин, 2010, 2011, 2012; Козеичева, 2011; Налиухин, 2015; Whisler et al., 1986; Wolf et al., 1989; Ehsani et al., 1999). В представленных результатах исследований анализ экспериментальных данных по применению удобрений сопровождался количественной оценкой полученного материала опыта с помощью методов математической статистики. В основу прогнозирования значений результирующего признака (прибавки урожайности сельскохозяйственных культур) положены эмпирические и полумпирические зависимости, параметры которых позволяли привести экспериментальные данные опытов в соответствие с описываемой системой. По мнению ряда ученых (Кулаковская, 1990, Литвак, 1990; Семенов, 1992; Прошкин, 2011, 2012; Козеичева, 2011), такой подход позволяет комплексно оценить влияние вариации исследуемых величин (агрохимические показатели плодородия почвы, дозы питательных веществ) и выполнить структурную и логическую организацию полученных экспериментальных данных в виде моделей различного уровня.

Наиболее важные задачи, которые решаются с применением моделирования, – это оптимизация питания растений (Иванова, 1988, 1989; Кулаковская, 1990; Шатилов, Силин, Шаров и др., 1996; Шатилов, Полетаев и др., 1997; Козлечков, Лабынцев, 2012), оценка интенсивности фотосинтеза и программирование урожаев (Шатилов, 1973; Шатилов, Замараев и др., 1987; 1990; Жуковский, 2014), определение оптимальных доз применения удобрений (Кулаковская, 1990; Моисеев, 1981; Шатилов, Замараев и др., 1987; Пуховский, Хохлов, 2011; Какпо, 2015), оценка плодородия земель (Фрид, 1990, 2012; Шишов, Карманов, Дурманов, 1987; Шатилов, Замараев и др., 1990; Прохорова, Фрид, 1993; Шатилов, Силин, Полев и др., 1996;

Полев, 1995; Романенков, Шевцова, Сиротенко, 2005), изучение круговорота биогенных элементов в земледелии и почвоведении (Кулаковская, 1990; Фрид, 2012), симбиотической фиксации азота (Хворова, Топаж, Абрамова, 2015).

В зависимости от выбранных математического аппарата и структуры модели, а также имеющихся в распоряжении исследователя информационной базы данных о количественных изменениях продуктивности и факторах ее определяющих, В.А. Прошкин (2012) выделил следующие виды моделей: экспертно-описательные, математические, динамические и концептуальные. Отличительными особенностями указанных моделей является их информативность, занимаемое место в агрохимических исследованиях и возможность использования в практике.

Экспертно-описательные модели, по мнению В.А. Прошкина (2011), служат для определения зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от агрохимических, биологических и агрофизических свойств почвы. Эти модели, существенно различающиеся по целевым функциям, информационной базе, степени формализации, математическому аппарату, обладают одной их объединяющей особенностью – это конструктивность лишь применительно к решаемым задачам, определяющим ареалы экстраполяции. При изменении характеристик факторов исследуемой системы резко осложняется экстраполяция модели, объясняемая следствием ее несовместимости с новой информацией о характеристике объекта. Поэтому удовлетворительного совпадения результатов моделирования и фактических изменений объекта не наблюдается (Рухович, 2016).

Математические модели подразделяют на два класса в соответствии с оптимизационным или имитационным режимом использования. В первом случае для заданной функции находят оптимальную стратегию, во втором – предсказывают последствия от выбора различной стратегии при заданных входных переменных (Моисеев, 1981; Литвак, 1990). Обычно эти модели представляют собой регрессионные уравнения различного типа. Чаще всего для анализа связи используют линейную множественную функцию:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n \quad (7)$$

или полином

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + \dots + a_{11}X_{12} + a_{22}X_{12} \dots \quad (8)$$

Математические модели обладают определенными недостатками, которые ограничивают возможность их использования для прогнозирования результативного признака (Козеичева, 2011). Среди недостатков математических моделей наиболее существенными можно считать следующие: во-первых, отсутствие возможности экстраполяции результатов за пределы условий, наблюдавшихся в опытах (Литвак, 1990), во-вторых, введение в регрессионные уравнения большого количества переменных делает множественный регрессионный анализ зависимым от случайных изменений какого-либо одного из факторов (Ларина, 1999). При этом сам регрессионный

анализ становится сложным и громоздким. В качестве идеальной иллюстрации этого негативного свойства можно указать на полиномы, выведенные И.М. Стребковым для озимой пшеницы, ячменя и картофеля, которые включают до 19–24 членов уравнения (Стребков, 1989; Прошкин, 2011). Еще одним ограничением использования математических моделей в практике, по мнению В.А. Прошкина (2012), является невозможность имитировать влияние совокупности свойств почвы в их динамическом состоянии.

Одним из решений указанной проблемы является построение и использование имитационных динамических моделей, основное преимущество которых заключается в том, что вид модельных уравнений, математические методы их решения, вводимые параметры-коэффициенты неизменны для широкого круга возможностей (Полуэктов, 1991; Полуэктов, Смоляр и др., 2006; Прошкин, 2012). Создание имитационных динамических моделей, отражающих совокупность взаимосвязей в системе «почва – растение – средство химизации – атмосфера», в свое время позволило достичь заметного прогресса в расчете доз удобрений и оценки продуктивности агроэкосистем (Литвак, 1990).

По-мнению В.А. Прошкина (2012), важным недостатком динамических моделей, имеющим принципиальное значение, является их громоздкость, необходимость введения большого количества информации о погодных условиях, свойствах почвы, необходимости задействования больших объемов компьютерной памяти и, как следствие, очень большая сложность их верификации. Кроме этого, вопросам агрохимии в указанных моделях уделяется крайне незначительное внимание. Так, в сводке работ, иллюстрирующих тенденции динамического моделирования, из тридцати представленных моделей формирования урожая только в пяти рассмотрены агрохимические вопросы, в том числе только в одной – применение удобрений (приводится по В.А. Прошкину, 2012).

Еще одним недостатком динамических моделей является возможность оценки влияния факторов внешней среды на продукционный процесс только при оптимальных значениях, что ограничивает возможность применения данной модели и ставит вопрос о необходимости совершенствования идентификационного обеспечения экспериментальным материалом разрабатываемых динамических моделей (Козеичева, 2011).

Учитывая недостатки вышеуказанных моделей В.А. Прошкин (2011, 2012) предлагает использовать не только традиционные приемы, как, например, описание влияния факторов внешней среды, в частности агрохимических свойств почвы, на продукционный процесс в системе «почва – растение – удобрение», но и выбор концепции построения модели, совершенствование идентификационного обеспечения экспериментальным материалом разрабатываемых моделей.

Методические принципы современного концептуального моделирования основываются на последовательном совершенствовании модели в целях более полной характеристики самой модели – иерархичность структуры ее объектов (Моисеев, 1981; Моделирование..., 1990; Прошкин, 2012). Данный метод моделирования позволяет составить модель разных процессов, в том числе прогноза эффективности минеральных удобрений,

в которой соблюдается принцип отсутствия внутреннего противоречия. Концептуальная модель включает данные о структуре, функциях и взаимосвязях объекта. На базе концептуальной модели строится математическая модель, целью которой является проверка правильности и взаимосогласованности представлений и данных, заложенных в модель.

По мнению В.А. Прошкина (2012), схема моделирования эффективности минеральных удобрений включает следующие этапы:

1. Изучение объекта и построение априорной модели.
2. Формирование исходной информации (в данном случае создание информационной базы данных по эффективности минеральных удобрений в зависимости от вариации агрохимических свойств почвы и доз удобрений).
3. Статистическая оценка выборки исходных данных (теснота, сопряженность, значимость связи изучаемых факторов системы с результативным признаком).
4. Построение имитационной модели с помощью формул.

Сама модель может быть представлена в различной форме: графически (рисунком), алгебраически (аппроксимационной формулой). Выходную информацию целесообразнее представить в форме табличной интерпретации, показывающей изменчивость результирующего признака в зависимости от вариации переменных величин. В исследовании по установлению эффективности удобрений это может быть прибавка урожайности сельскохозяйственных культур от вариации агрохимических свойств почвы и доз удобрений.

Пример концептуального моделирования представлен на рис. 6. В общем виде последовательность расчета с учетом особенностей влияния агрохимических свойств почвы на эффективность минеральных удобрений можно представить в виде аппроксимационной формулы. Прекрасной иллюстрацией принципиальной возможности использования подобных моделей для прогноза эффективности минеральных удобрений в зависимости от конкретной агрохимической ситуации является верификация аппроксимационных формул по прогнозу эффективности азотных, фосфорных удобрений, представленная в работах С.А. Шафрана (2008, 2010 (в соавторстве)), В.А. Прошкина (2014), Е.С. Козеичевой (2011), А.Н. Налиухина (2015) в виде табличной интерпретации выходной информации. Такой подход в моделировании позволяет не только оценить эффективность применения минеральных удобрений, но и других факторов, участвующих в продукционном процессе сельскохозяйственных культур (биопрепараты ассоциативных диазотрофов), а также учесть не только изменчивость агрохимических свойств почв, но и варьирование метеорологических условий. В связи с тем, что при инокуляции сельскохозяйственных культур наблюдается нерегулярная воспроизводимость положительных результатов от применения биопрепаратов (Умаров, 2006, 2009; Умаров, Кураков, Степанов, 2007; Skonieski et al., 2017), нами была предпринята попытка составить прогноз реакции растений яровой пшеницы и ячменя на инокуляцию семян биопрепаратами ассоциативных диазотрофов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ...

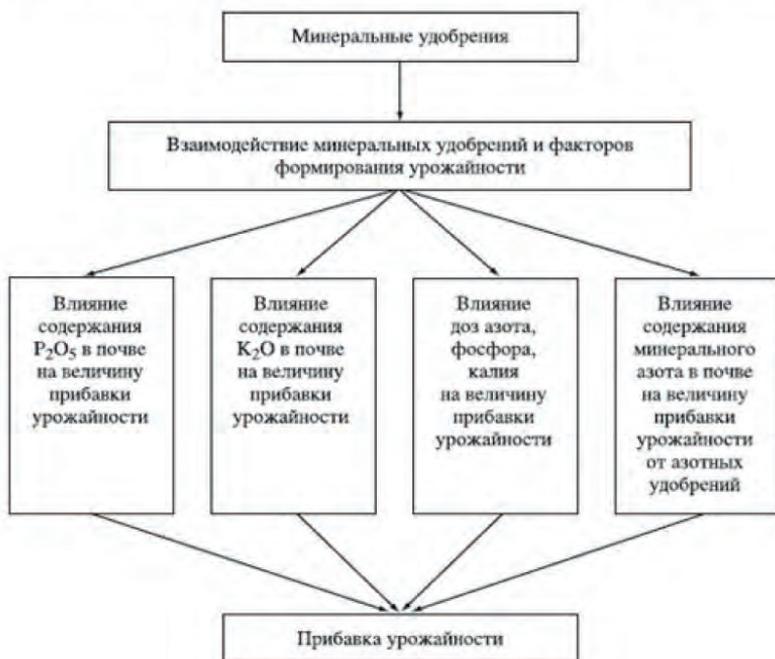


Рис.6. Модель прогнозирования прибавки урожайности зерновых культур от минеральных удобрений при различном содержании минерального азота, подвижных форм фосфора и калия в почве.

Прогноз эффективности применения биопрепаратов на разных фонах минерального питания и азотных удобрений при возделывании зерновых культур. Управление микробиологическими процессами связывания атмосферного азота с целью сохранения плодородия почв стало одной из важнейших теоретических и практических задач почвоведения и земледелия (Шильникова, Серова, 1983). За последнее время во всем мире, в том числе и в России, интерес к проблемам микробиологии в сельском хозяйстве неизмеримо вырос. Исследователям удалось значительно расширить и углубить представления о роли микроорганизмов в жизни растений. Наиболее значимые действия микроорганизмов заключаются в повышении доступности минеральных питательных веществ почвы, фиксации атмосферного азота, подавлении фитопатогенной инфекции и гормональном воздействии на рост растений (Тихонович, Кожемяков, Чеботарь и др., 2005; Тихонович, Кравченко, Шапошников, 2010). Существенным является микробиологическая фиксация атмосферного азота для растений, что обусловлено главенствующей ролью этого процесса в азотном балансе биосферы Земли; а также большой перспективой его как источника связанного азота для обеспечения быстрорастущих нужд сельскохозяйственного производства (Никитин, 2015).

Благодаря исследованиям последних десятилетий получен значительный экспериментальный материал о положительной реакции на инокуляцию корневыми diaзотрофами зерновых культур (яровая пшеница и ячмень) на дерново-подзолистых почвах (Виноградова, 1999(а); Чистотин, 2001; Бердников, 2002; Лекомцев, 2002; Волков, 2003; Пасынков, 2004; Евдокимова, 2005; Сологуб, 2005; Тарасов, 2005; Быков, 2006; Новоселова, 2007; Безгодова, 2009; Горячкин, 2013), серых лесных почвах (Зюзина, 2008; Миронова, 2009) и черноземах (Шотт 2007; Никифорова, 2009; Ляличкин, 2011; Никитин, 2015; Аужанова, 2015). По оценкам И.А. Тихоновича, А.П. Кожемякова, В.К. Чеботаря (2005), средняя эффективность микробиологических препаратов на зерновых культурах составляет 16–33%. Однако колебания прибавки урожайности зерна от применения препаратов на основе ассоциативных diaзотрофов существенно различаются от почвенно-климатических условий (табл. 4.1).

Из представленных данных следует, что прибавки урожайности как яровой пшеницы, так и ячменя от инокуляции семян препаратами ассоциативных микроорганизмов значительно варьируют. Нерегулярная воспроизводимость результатов инокуляции является причиной, препятствующей широкому использованию в сельском хозяйстве «ассоциативных» бактериальных удобрений. Особенно значительное варьирование эффективности биопрепаратов связано с агрохимическими свойствами почвы и метеорологическими условиями при возделывании культур (Завалин, 2005; Умаров, 1986, 2009; Умаров, Кураков, Степанов, 2007).

В целях подготовки рекомендаций для производства представляется необходимым определить эффективность биопрепаратов diaзотрофов отдельно и при внесении азотных удобрений в зависимости от агрохимических свойств почв и погодных условий в Нечерноземной зоне России на яровых зерновых культурах (яровая пшеница, ячмень).

Решение поставленной задачи базируется на анализе исходного материала, в качестве которого использованы результаты полевых опытов с яровой пшеницей и ячменем, проведенными научными организациями (базы данных Лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий Всероссийского научно-исследовательского института сельскохозяйственной микробиологии (заведующий лабораторией А.П. Кожемяков) и Лаборатории агрохимии минерального и биологического азота Всероссийского научно-исследовательского института имени Д.Н. Прянишникова, а также научные публикации). Их схема позволяла вычленить действие микробных препаратов diaзотрофов и азотных удобрений на фоне применения фосфорных и калийных удобрений:

1. P₃₀₋₆₀ K₄₅₋₉₀ (фон)
2. фон + N₃₀
3. фон + биопрепарат
4. фон + N₃₀ + биопрепарат

В качестве агрохимических показателей, по которым проводили исследования, использованы: содержание гумуса (по Тюрину), величина кислотности (рН_{KCl}), которые наиболее полно представлены в публикациях и отчетных материалах. При анализе данных основными предшественниками

Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы

для яровой пшеницы были зерновые культуры (озимая пшеница, овес, ячмень), для ячменя – зерновые (озимая пшеница) и травы (многолетние злаковые, вико-овес).

Таблица 4.1

Эффективность биопрепаратов на основе ассоциативных diaзотрофов в краткосрочных полевых опытах с зерновыми культурами*

Регион	Урожайность зерна без инокуляции, ц/га	Прибавка урожайности зерна от инокуляции биопрепаратов, ц/га
Яровая пшеница		
<i>дерново-подзолистые суглинистые почвы</i>		
Брянская область	3,1–5,5	-0,5–1,6
Московская область	10,8 – 17,3	-0,1–9,1
Тверская область	15,2 – 24,1	1,9–6,1
Республика Марий Эл	14,5 – 23,6	0,6–3,1
Кировская область	7,5 – 29,6	-0,5–5,3
Ивановская область	16,9 – 20,5	1,7–3,6
Ячмень		
<i>дерново-подзолистые суглинистые почвы</i>		
Брянская область	9,1–13,0	-0,9–2,3
Московская область	7,1–36,2	0,6–3,6
Владимирская область	17,6–19,9	2,2–6,1
Смоленская область	9,2–20,9	1,7–6,9
Республика Марий Эл	6,9–28,6	0,3–3,4
Ивановская область	5,7–18,9	1,8–7,4
Вологодская область	21,8–23,4	1,1–2,7

* Представлены результаты краткосрочных опытов, указанных в тексте выше, и базы данных ВНИИ агрохимии и ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии

Дополнительным фактором, который внесен в анализ и использован для составления модели, является гидротермический коэффициент по Г.Т. Селянинову (Журина, Лосев, 2012), учитывающий условия увлажнения вегетационного периода (ГТК). Основанием необходимости учета ГТК для составления модели стал предварительный анализ экспериментальных данных, который показал, что прибавка урожайности зерна яровой пшеницы и ячменя существенно различалась из-за неодинаковых метеорологических условий в период их вегетации.

Число сопряженных наблюдений между агрохимическими показателями дерново-подзолистой почвы и величиной прибавки урожайности зерновых культур от биопрепаратов, азотных удобрений составляло: для яровой пшеницы – 47, ячменя – 43 (табл. 4.2).

При этом корректный прогноз (модель) изменчивости прибавки урожайности зерна возможен только при использовании такой последовательности расчета, которая позволяет учесть все рассмотренные особенности корреляционных связей (Прошкин, Андрианов, Шаброва, 2011).

Таблица 4.2

Характеристика выборки по зерновым культурам на дерново-подзолистых почвах (биопрепараты диазотрофов, азотные удобрения)

№ п/п	Показатели	Интервалы значений
1. Яровая пшеница		
1.	Гумус, %	1,2–2,8
2.	pH _{KCL}	4,6–6,7
3.	ГТК (май)	0,6–2,5
4.	ГТК (июнь)	0,3–2,8
5.	ГТК (июль)	0,1–2,3
6.	ГТК (май-июнь)	0,5–2,4
7.	ГТК (май-июль)	0,3–1,9
8.	ГТК (вегетационный период)	0,5–1,9
9.	Прибавка урожайности зерна от биопрепаратов на фоне РК, ц/га	-0,5–9,1
10.	Прибавка урожайности зерна от азотного удобрения на фоне РК, ц/га	-1,4–7,5
11.	Прибавка урожайности зерна от биопрепаратов на фоне NPK, ц/га	0,3–10,4
12.	Прибавка урожайности зерна от азотного удобрения и биопрепаратов на фоне РК, ц/га	-0,3–14,9
2. Ячмень		
1.	Гумус, %	1,3–2,3
2.	pH _{KCL}	4,6–6,7
3.	ГТК (май)	0,4–2,7
4.	ГТК (июнь)	0,3–3,4
5.	ГТК (июль)	0,1–2,7
6.	ГТК (май-июнь)	0,6–2,6
7.	ГТК (май-июль)	0,6–2,2
8.	ГТК (июнь-июль)	0,4–3,0
9.	ГТК (вегетационный период)	0,6–2,1
10.	Прибавка урожайности зерна от биопрепаратов на фоне РК, ц/га	-0,9–6,7
11.	Прибавка урожайности зерна от азотного удобрения на фоне РК, ц/га	0,4–8,4
12.	Прибавка урожайности зерна от биопрепаратов на фоне NPK, ц/га	-0,8–9,2
13.	Прибавка урожайности зерна от азотного удобрения и биопрепаратов на фоне РК, ц/га	-0,2–13,0

Представленные выборки характеризуются как большие ($n > 30$), вместе с тем они охватывали практически весь возможный диапазон агрохимических показателей дерново-подзолистых почв, который встречается в Нечерноземной зоне Центральной России. Варьирование изучаемых факторов на яровой пшенице: гумуса – от 1,2 до 2,8%, pH_{KCL} – от 4,6 до 6,8, ГТК в зависимости от периода вегетации изменялся от 0,3 до 2,8. Прибавка урожайности яровой пшеницы от действия биопрепаратов и азотного удобрения изменялась от -0,5 до 14,9 ц/га.

Выборки, взятые для анализа влияния отдельных агрохимических свойств почв и погодных условий на действие биопрепаратов в посевах ярового ячменя, имели следующее варьирование: гумус – от 1,3 до 2,3%, pH_{KCL} – от 4,6 до 6,7, ГТК варьировал от 0,1 до 3,0. Прибавка урожайности ярового ячменя от действия биопрепаратов и азотного удобрения изменялась от -0,9 до 13,0 ц/га.

В дальнейшем проведены расчеты по выявлению зависимостей прибавки урожайности зерна отдельно для яровой пшеницы и ячменя.

Яровая пшеница. Статистический анализ полученных данных (табл. 4.3) показал, что связь урожайности и ее прибавки для яровой пшеницы с показателями агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы и метеорологическими условиями при применении биологических препаратов на основе ризосферных ассоциативных микроорганизмов носит криволинейный характер. Среди изученных факторов существенная теснота связи отмечена для степени кислотности почвы ($\eta_{yx}=0,59-0,80$), гумуса ($\eta_{yx}=0,55-0,72$) и ГТК (май) ($\eta_{yx}=0,42-0,65$).

В исследуемой выборке на дерново-подзолистых почвах по результатам анализа наибольшее влияние на эффективность биопрепаратов оказывает реакция почвенной среды. Особенно это заметно при инокуляции биопрепаратами на фоне полного минерального удобрения ($r = 0,72$; $\eta_{yx} = 0,80$).

Яровая пшеница имеет менее развитую корневую систему по сравнению с другими злаковыми культурами, поэтому благоприятный водный и температурный режим имеет важное значение в формировании высоких урожаев зерна (Бараев, 1978). Оценка влияния метеорологических условий возделывания сельскохозяйственных культур по гидротермическому коэффициенту позволяет прогнозировать эффективность действия или применения микробных препаратов. Расчеты корреляционных связей ГТК за разные периоды вегетации с прибавкой зерна от инокуляции биопрепаратами в основном можно охарактеризовать как слабые по тесноте. При оценке зависимости по индексу детерминации имел место незначительный размах изменений величин этого показателя: 0,00–0,09. Определение корреляционного отношения для разных значений ГТК показали, что только с метеорологическими условиями мая отмечается средняя по тесноте связь. Изменчивость прибавки урожайности зерна яровой пшеницы при инокуляции биопрепаратами от ГТК (май) проявлялась как криволинейная по форме ($\eta_{yx}=0,65$) при 5% уровне значимости на фоне РК-удобрений, на фоне НРК $\eta_{yx}=0,42$, а в варианте совместного применения биопрепаратов и азотных удобрений – $\eta_{yx}=0,49$.

Установленные связи имели криволинейный характер, поэтому зависимость описывается уравнением вида параболы: $Y = ax^2 + bx + c$. Приоритет криволинейности подтвержден критерием линейности ($F_{\phi} > F_{\tau}$).

Таблица 4.3

Характеристика выборки по зерновым культурам на дерново-подзолистых почвах
(биопрепараты диазотрофов, азотные удобрения)

Аргументы системы	Вид корреляции						Значимость критерия линейности корреляции	
	Линейная		уровень значимости	Криволинейная			Fф	Fт (0,05)
	коэффициенты корреляции r	детерминации		корреляционное отношение, η_{yx}	коэффициент детерминации	уровень значимости		
Действие биопрепаратов на фоне РК								
Гумус, %	0,56	0,32	0,05	0,70	0,49	0,05	7,29	3,21
pH _{KCL}	0,53	0,28	0,05	0,68	0,46	0,05	4,54	2,82
ГТК (май)	-0,26*	0,07	0,05	0,65	0,42	0,05	8,47	2,82
ГТК (июнь)	0,12*	0,01	0,05	0,27**	0,07	0,05	1,37	3,21
ГТК (июль)	-0,19*	0,04	0,05	0,31	0,10	0,05	1,48	3,21
ГТК (май-июнь)	-0,09*	0,01	0,05	0,22**	0,05	0,05	0,90	3,21
ГТК (май-июль)	-0,20*	0,04	0,05	0,30	0,09	0,05	1,23	3,21
ГТК (вег. пер.)	-0,25*	0,06	0,05	0,44	0,20	0,05	3,60	3,21
Действие азотного удобрения N ₃₀ на фоне РК								
Гумус, %	0,10*	0,01	0,05	0,22**	0,05	0,05	0,90	3,21
pH _{KCL}	-0,12*	0,02	0,05	0,29	0,09	0,05	1,09	2,82
ГТК (май)	-0,04*	0,00	0,05	0,42	0,18	0,05	4,56	3,21
ГТК (июнь)	0,19*	0,04	0,05	0,25**	0,06	0,05	0,59	3,21
ГТК (июль)	0,02*	0,00	0,05	0,24**	0,06	0,05	1,30	3,21
ГТК (май-июнь)	0,15*	0,02	0,05	0,23**	0,05	0,05	0,68	3,21
ГТК (май-июль)	0,19*	0,04	0,05	0,24**	0,06	0,05	0,58	3,21
ГТК (вег. пер.)	0,10*	0,01	0,05	0,28**	0,08	0,05	1,53	3,21
Действие биопрепаратов на фоне N ₃₀ PK								
Гумус, %	0,32	0,10	0,05	0,72	0,52	0,05	18,90	3,21
pH _{KCL}	0,72	0,52	0,05	0,80	0,64	0,05	4,75	2,82
ГТК (май)	0,03*	0,00	0,05	0,42	0,17	0,05	4,45	3,21
ГТК (июнь)	0,10*	0,01	0,05	0,32	0,11	0,05	2,27	3,21
ГТК (июль)	-0,30	0,09	0,05	0,39	0,15	0,05	1,67	3,21
ГТК (май-июнь)	0,03*	0,00	0,05	0,16**	0,03	0,05	0,54	3,21
ГТК (май-июль)	-0,21*	0,04	0,05	0,34	0,12	0,05	1,78	3,21
ГТК (вег. пер.)	-0,24*	0,06	0,05	0,27**	0,08	0,05	0,41	3,21
Действие азотного удобрения в дозе N ₃₀ и биопрепаратов на фоне РК								
Гумус, %	0,31	0,10	0,05	0,55	0,31	0,05	6,39	3,21
pH _{KCL}	0,45	0,20	0,05	0,59	0,35	0,05	3,18	2,82
ГТК (май)	0,02*	0,00	0,05	0,49	0,25	0,05	6,96	3,21
ГТК (июнь)	0,20*	0,04	0,05	0,36	0,13	0,05	2,24	3,21
ГТК (июль)	-0,19*	0,04	0,05	0,42	0,18	0,05	3,73	3,21
ГТК (май-июнь)	0,06*	0,00	0,05	0,18**	0,03	0,05	0,68	3,21
ГТК (май-июль)	-0,01*	0,00	0,05	0,19**	0,04	0,05	0,83	3,21
ГТК (вег. пер.)	-0,13*	0,02	0,05	0,36	0,13	0,05	2,77	3,21

* Значение коэффициента корреляции не существенно при 5% уровне значимости (значение критерия $t_{\phi} < t_t$).

** Значение корреляционного отношения не существенно при 5% уровне значимости (значение критерия $t_{\phi} < t_t$).

В целях выявления взаимного влияния микробных препаратов и азотных удобрений на урожайность зерна проанализированы статистические показатели, из которых следует, что при применении невысокой дозы азота (N₃₀) связь между содержанием гумуса, степенью кислотности почвы и прибавкой урожайности яровой пшеницы оказалась менее устойчивой. Только определение корреляционного отношения для метеорологических условий мая (ГТК (май)) показало существенную нелинейную связь ($\eta_{yx}=0,42$).

Корректный прогноз изменчивости прибавки урожайности в общем виде можно представить как аппроксимационный алгоритм в следующей

алгебраической форме (Прошкин, 2012):

$$Y = (a_1x_1^2 + b_1x_1 + c_1) + (a_2x_2^2 + b_2x_2 + c_2) + (a_3x_3^2 + b_3x_3 + c_3) \quad (9)$$

где: x_1 – содержание гумуса, x_2 – pH_{KCL} , x_3 – ГТК (май), $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ – коэффициенты уравнения, c_1, c_2, c_3 – свободные члены.

В варианте РК-удобрений модель прогноза прибавки урожайности от инокуляции биопрепаратом выглядит следующим образом:

$$Y = (a_4x_1^2 + b_4x_1 + c_4) + (a_5x_2^2 + b_5x_2 + c_5) + (a_6x_3^2 + b_6x_3 + c_6) \quad (10)$$

Для варианта NPK-удобрений соответственно:

$$Y = (a_7x_1^2 + b_7x_1 + c_7) + (a_8x_2^2 + b_8x_2 + c_8) + (a_9x_3^2 + b_9x_3 + c_9) \quad (11)$$

Для варианта РК-удобрений модель прогноза прибавки урожайности от применения инокуляции биопрепаратом и азотного удобрения соответственно:

$$Y = (a_{10}x_{12} + b_{10}x_1 + c_{10}) + (a_{11}x_2^2 + b_{11}x_2 + c_{11}) + (a_{12}x_3^2 + b_{12}x_3 + c_{12}) \quad (12)$$

где: a_{4-12}, b_{4-12} – коэффициенты уравнения, c_{4-12} – свободные члены.

Верификация данных моделей позволяет определить долю каждого фактора в формировании прибавки урожайности зерна яровой пшеницы. Установленная Т.Н. Кулаковской (1990) взаимосвязь агрохимических показателей плодородия почвы с величиной урожая сельскохозяйственных культур ею предложена как основа расчетов так называемого «комплексного агрохимического балла», показателя, по которому каждое свойство плодородия почвы можно выразить в относительных единицах от 0,1 до 1,0 (Налиухин, 2015).

В представленных выборках данных средняя прибавка урожайности зерна яровой пшеницы от применения биопрепаратов на фоне РК-удобрения составила 3,0 ц/га, на фоне NPK-удобрений – 2,7 ц/га. Средняя прибавка урожайности от совместного применения азотного удобрения и биопрепаратов на фоне РК-удобрения равнялась 6,4 ц/га. Принимая данные величины прибавки урожайности зерна яровой пшеницы за 100%, в соответствии с предлагаемым Т.Н. Кулаковской (1990) методом комплексной оценки, рассчитан относительный вклад для каждого фактора (аргумента системы) по уравнению (1) (глава 2):

$$OB = \eta^2_A \cdot 100 / (\eta^2_A + \eta^2_B + \eta^2_C), \quad (1)$$

где: **OB** – относительный вклад фактора, %;

η^2 – индекс детерминации, соответственно для факторов:

x_1 – содержание гумуса, x_2 – pH_{KCL} , x_3 – ГТК (май).

Количественный вклад соотносили с максимумом функции по каждому изучаемому фактору системы по уравнению (2) (глава 2):

$$KB = MF \cdot OB, \quad (2)$$

где: **KB** – количественный вклад фактора в формирование прибавки урожайности зерна, ц/га;

MF – максимум прибавки урожайности зерна яровой пшеницы, ц/га.

Расчёты, характеризующие относительный и количественный вклад каждого фактора в формирование прибавки урожайности зерна яровой пшеницы в зависимости от гумуса, $r_{НКЛ}$ и ГТК, приведены в таблице 4.4. Наибольший вклад в формирование прибавки урожайности пшеницы оказывают такие факторы, как содержание гумуса (относительный вклад 34–39%) и $r_{НКЛ}$ (34–48%), менее значительное, но достоверное при 5% уровне значимости – ГТК за май (13–30%). Более существенное влияние условий влагообеспеченности в мае на действие биопрепаратов в варианте РК-удобрений. Внесение минерального азота удобрения на фоне фосфорного и калийного удобрений нивелирует (уменьшает) влияние метеорологических условий на эффективность препаратов на основе штаммов ассоциативных микроорганизмов.

На следующем этапе в соответствии с аппроксимационными алгоритмами выведены уравнения регрессии отдельно для каждого аргумента системы (табл. 4.5). Выявленные особенности корреляционных связей (уравнения) использованы как теоретическое обоснование для корректного описания количественной изменчивости прибавки урожайности яровой пшеницы от инокуляции биопрепаратами под влиянием агрохимических факторов почвенного плодородия и метеорологических условий.

Таблица 4.4

Факторы модели и их вклад в формирование прибавки урожайности зерна яровой пшеницы на дерново-подзолистых почвах Нечерноземной зоны Центральных районов России

Факторы	$\eta_{\text{вк}}^2$	Относительный вклад, %	Прибавка урожая зерна, ц/га	Количественный вклад факторов, ц/га
Действие биопрепаратов на фоне РК-удобрений				
Гумус, %	0,49	36	3,0	1,1
$r_{НКЛ}$	0,46	34		1,0
ГТК (май)	0,42	30		0,9
Σ	1,37	100		3,0
Действие биопрепаратов на фоне N_{30} РК				
Гумус, %	0,52	39	2,7	1,1
$r_{НКЛ}$	0,64	48		1,3
ГТК (май)	0,17	13		0,4
Σ	1,33	100		2,7
Действие азотного удобрения в дозе N_{30} и биопрепаратов на фоне РК				
Гумус, %	0,31	34	6,4	2,2
$r_{НКЛ}$	0,35	39		2,5
ГТК (май)	0,25	27		1,7
Σ	0,91	100		6,4

Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы

Таблица 4.5

Зависимости прибавки урожайности зерна яровой пшеницы, возделываемой на дерново-подзолистой почве, при инокуляции биопрепаратами

Факторы	Уравнение регрессии	η_{yx}
Действие биопрепаратов на фоне РК-удобрений		
Гумус, %	$Y = 0,642X^2 - 1,953X + 1,670$	0,70
pH_{KCL}	$Y = 0,135X^2 - 1,1029X + 2,333$	0,68
ГТК (май)	$Y = -0,403X^2 + 0,902X + 0,399$	0,65
Действие биопрепаратов на фоне NPK-удобрений		
Гумус, %	$Y = 0,506X^2 - 1,322X + 0,929$	0,72
pH_{KCL}	$Y = 0,286X^2 - 2,749X + 6,898$	0,80
ГТК (май)	$Y = -0,405X^2 + 0,929X - 0,182$	0,42
Действие азотного удобрения и биопрепаратов на фоне РК-удобрений		
Гумус, %	$Y = 1,068X^2 - 3,094X + 2,749$	0,55
pH_{KCL}	$Y = 0,419X^2 - 3,990X + 10,430$	0,59
ГТК (май)	$Y = -0,448X^2 + 1,665X + 0,176$	0,49

По уравнениям регрессии рассчитывался количественный вклад по отдельным аргументам системы, а далее – суммарный вклад гумуса, pH_{KCL} и ГТК в формировании прибавки урожайности с учетом их вариабельности. В качестве примера приводим вклад включенных в аппроксимационное уравнение факторов для варианта действие биопрепаратов на фоне РК-удобрений (табл. 4.6).

Таблица 4.6

Прогноз максимального вклада факторов (аргументов) системы в формирование прибавки урожайности яровой пшеницы на дерново-подзолистых почвах от применения биопрепаратов на основе ассоциативных диазотрофов на фоне РК-удобрений в зависимости от содержания гумуса, значений pH_{KCL} и ГТК (май)

Факторы (аргументы системы)	Градации	Максимум прибавки урожайности, ц/га
Гумус, %, (x_1)	1,4	0,19
	1,5	0,19
	2,0	0,33
	2,5	0,80
	2,7	1,08
pH_{KCL} , (x_2)	4,9	0,18
	5,0	0,20
	5,5	0,36
	6,0	0,59
	6,5	0,88
	6,7	1,02
ГТК (май) по Селянинову, (x_3)	0,7	0,83
	0,9	0,88
	1,1	0,90
	1,3	0,89
	1,5	0,85
	1,8	0,72
	2,0	0,59
	2,4	0,24
	2,5	0,14

На основе вклада отдельных факторов рассчитывали прибавки урожайности зерна яровой пшеницы при ее инокуляции биопрепаратами на фоне РК-удобрений с учетом вариации гумуса, рН_{ксл} и ГТК. Итоговые данные в виде прогноза представлены в таблице 4.7. Прогноз показал, что увеличение содержания гумуса в почве с 1,5 до 2,7% сопровождалось ростом прибавки урожайности яровой пшеницы от применения биопрепаратов. Наибольшая прибавка урожая зерна от инокуляции препаратами ризосферных ассоциативных diaзотрофов отмечена при содержании гумуса 2,5–2,7%.

Максимальная эффективность от применения биопрепаратов на яровой пшенице получена при нейтральной реакции почвенной среды (рН_{ксл} 6,5–6,7). С ростом кислотности почвы до 4,9 прибавка зерна снижается.

Таблица 4.7

Прогноз прибавки урожайности зерна яровой пшеницы на дерново-подзолистых почвах от применения биопрепаратов на основе ассоциативных diaзотрофов в зависимости от содержания гумуса, значений рН_{ксл} и ГТК (май)
(вариант: инокуляция БП на фоне внесения РК-удобрений)

Гумус, %	рН _{ксл}	Урожай- ность на РК- фоне, ц/га	ГТК (май)					
			0,7-1,0	1,01-1,3	1,31-1,8	1,81-2,0	2,01-2,4	2,41-2,5
<1,5	<5,0	5,0	1,2	1,3	1,2	1,1	1,0	0,5
	5,0–5,5	7,5	1,4	1,5	1,4	1,3	1,2	0,7
	5,6–6,0	9,8	1,6	1,7	1,6	1,5	1,4	0,9
	6,1–6,5	11,1	1,9	2,0	1,9	1,8	1,7	1,2
1,5–2,0	6,6–6,7	14,5	2,0	2,1	2,1	2,0	1,8	1,4
	<5,0	7,1	1,3	1,4	1,4	1,2	1,1	0,6
	5,0–5,5	11,3	1,5	1,6	1,5	1,4	1,3	0,8
	5,6–6,0	14,9	1,7	1,8	1,8	1,6	1,5	1,0
2,01– 2,5	6,1–6,5	16,9	2,0	2,1	2,1	1,9	1,8	1,3
	6,6–6,7	18,2	2,2	2,2	2,2	2,1	1,9	1,5
	<5,0	10,8	1,8	1,9	1,8	1,7	1,6	1,1
	5,0–5,5	12,4	2,0	2,1	2,0	1,9	1,7	1,3
2,51– 2,7	5,6–6,0	17,8	2,2	2,3	2,2	2,1	2,0	1,5
	6,1–6,5	22,7	2,5	2,6	2,5	2,4	2,3	1,8
	6,6–6,7	23,6	2,6	2,7	2,7	2,5	2,4	2,0
	<5,0	11,8	2,1	2,2	2,1	2,0	1,9	1,4
	5,0–5,5	14,1	2,3	2,3	2,3	2,2	2,0	1,6
	5,6–6,0	18,7	2,5	2,6	2,5	2,4	2,3	1,8
	6,1–6,5	23,4	2,8	2,9	2,8	2,7	2,6	2,1
	6,6–6,7	24,1	2,9	3,0	2,9	2,8	2,7	2,2

Расчет влияния метеорологических условий мая на действие биопрепаратов в представленной модели показал, что наибольшие прибавки урожайности зерна яровой пшеницы могут быть получены при оптимальном увлажнении (ГТК за май =1,0–1,3).

Одной из задач по исследованию биологического азота является определение основных параметров факторов среды для реализации потенциальной азотфиксирующей способности ассоциативных систем (реакция почвенного раствора, обеспеченность почвы макро- и микроэлементами минерального питания, а также климатических факторов:

температура и инсоляция, влажность почвы и воздуха (Тихонович, Завалин, 2016). Для разработки рекомендаций производству важным аспектом является установление эффективности инокуляции биопрепаратами ассоциативных микроорганизмов на урожайность сельскохозяйственной культуры при применении полного минерального удобрения, что особенно важно для дерново-подзолистой почвы. На основе вклада отдельных факторов с использованием аппроксимационного алгоритма рассчитывали прибавки урожайности зерна яровой пшеницы. Анализ прогноза прибавки урожайности яровой пшеницы от инокуляции биопрепаратами на фоне полного минерального удобрения (табл. 4.8) показывает, что с ростом гумусированности почвы и приближением реакции почвенной среды к нейтральному значению растет и прибавка урожая зерна. Максимальная прибавка урожайности возможна при содержании гумуса 2,5–2,7% и величине pH_{KCL} 6,5–6,7.

Таблица 4.8

Прогноз прибавки урожайности зерна яровой пшеницы на дерново-подзолистых почвах от применения биопрепаратов на основе ассоциативных diaзотрофов в зависимости от содержания гумуса, значений pH_{KCL} и ГТК (май)

(вариант: инокуляция БП на фоне внесения NPK-удобрений)

Гумус, %	pH_{KCL}	Урожай- ность на NPK фоне, ц/га	ГТК (май)					
			0,7-1,0	1,01-1,3	1,31-1,8	1,81-2,0	2,01-2,4	2,41-2,5
<1,5	<5,0	5,8	0,7	0,7	0,7	0,5	0,4	0,0
	5,0–5,5	8,5	0,8	0,8	0,8	0,7	0,5	0,2
	5,6–6,0	11,1	1,1	1,1	1,1	0,9	0,8	0,4
	6,1–6,5	12,6	1,5	1,5	1,5	1,3	1,2	0,8
	6,6–6,7	16,2	1,7	1,7	1,7	1,6	1,4	1,0
1,5–2,0	<5,0	8,1	0,9	1,0	0,9	0,8	0,7	0,3
	5,0–5,5	12,6	1,0	1,1	1,0	0,9	0,8	0,4
	5,6–6,0	16,9	1,3	1,4	1,3	1,2	1,1	0,7
	6,1–6,5	19,1	1,7	1,8	1,8	1,6	1,5	1,1
	6,6–6,7	20,7	1,9	2,0	1,9	1,9	1,8	1,7
2,01– 2,5	<5,0	12,3	1,3	1,4	1,4	1,3	1,1	0,7
	5,0–5,5	14,5	1,5	1,6	1,5	1,4	1,3	0,9
	5,6–6,0	19,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,5	1,1
	6,1–6,5	25,8	2,2	2,2	2,2	2,1	1,9	1,6
	6,6–6,7	26,9	2,4	2,4	2,4	2,3	2,1	1,8
2,51– 2,7	<5,0	14,3	1,6	1,7	1,6	1,5	1,4	1,0
	5,0–5,5	16,7	1,8	1,8	1,8	1,7	1,5	1,1
	5,6–6,0	21,4	2,0	2,1	2,0	1,9	1,8	1,4
	6,1–6,5	26,8	2,4	2,5	2,5	2,3	2,2	1,8
	6,6–6,7	27,8	2,5	2,7	2,7	2,5	2,4	2,0

Выведенное уравнение регрессии о влиянии значений ГТК за май на эффективность препаратов diaзотрофов, которое использовали при построении прогноза, показывает, что рост прибавки урожайности зерна пшеницы будет при увеличении ГТК (май) до 1,3, дальнейшее его изменение в сторону увеличения приводит к резкому снижению результирующего признака (прибавки урожайности зерна). При содержании гумуса менее 1,5%, pH_{KCL} ниже 5,0 и ГТК=2,4-2,5 эффективность биопрепаратов будет нулевой.

В современных условиях развития отечественного земледелия особую актуальность приобретает комплексное использование традиционных средств химизации, в том числе промышленных минеральных удобрений с микробиологическими препаратами. Увеличение использования фиксированного диазотрофными бактериями биологического азота при выращивании сельскохозяйственных культур имеет особое значение не только для устранения дефицита азота в питании растений, но и для рационального природопользования (Завалин, 2005). В целях выработки практических предложений производству разработан прогноз прибавки урожайности зерна яровой пшеницы при применении азотного удобрения и инокуляции биопрепаратами диазотрофных бактерий (табл. 4.9).

Таблица 4.9

Прогноз прибавки урожайности зерна яровой пшеницы на дерново-подзолистых почвах от применения азотного удобрения и биопрепаратов на основе ассоциативных диазотрофов в зависимости от содержания гумуса, значений рН_{KCL} и ГТК (май)
(вариант: инокуляция БП + N на фоне РК-удобрений)

Гумус, %	рН _{KCL}	Урожай- ность на РК фонсе, ц/га	ГТК (май)					
			0,7-1,0	1,01-1,3	1,31-1,8	1,81-2,0	2,01-2,4	2,41-2,5
<1,5	<5,0	5,0	2,7	2,9	3,1	3,2	3,2	3,0
	5,0–5,5	7,5	2,9	3,1	3,3	3,4	3,4	3,2
	5,6–6,0	9,8	3,3	3,6	3,8	3,8	3,8	3,6
	6,1–6,5	11,1	3,9	4,2	4,4	4,4	4,4	4,2
	6,6–6,7	14,5	4,2	4,5	4,7	4,7	4,7	4,6
1,5–2,0	<5,0	7,1	3,0	3,2	3,4	3,5	3,5	3,3
	5,0–5,5	11,3	3,2	3,5	3,7	3,7	3,7	3,5
	5,6–6,0	14,9	3,6	3,9	4,1	4,1	4,1	3,9
	6,1–6,5	16,9	4,3	4,5	4,7	4,8	4,7	4,6
	6,6–6,7	18,2	4,6	4,7	5,0	5,1	5,0	4,9
2,01– 2,5	<5,0	10,8	3,9	4,1	4,3	4,4	4,3	4,2
	5,0–5,5	12,4	4,1	4,3	4,5	4,6	4,6	4,4
	5,6–6,0	17,8	4,5	4,7	4,9	5,0	4,9	4,8
	6,1–6,5	22,7	5,1	5,3	5,5	5,6	5,5	5,4
	6,6–6,7	23,6	5,4	5,7	5,9	5,9	5,8	5,7
2,51– 2,7	<5,0	11,8	4,3	4,6	4,8	4,8	4,8	4,7
	5,0–5,5	14,1	4,6	4,8	5,0	5,1	5,1	4,9
	5,6–6,0	18,7	5,0	5,2	5,4	5,5	5,4	5,3
	6,1–6,5	23,4	5,6	5,8	6,0	6,1	6,0	5,9
	6,6–6,7	24,1	5,9	6,2	6,4	6,4	6,3	6,2

Анализируя полученные данные прогноза прибавки урожайности, можно отметить, что применение биопрепаратов и азотного удобрения при возделывании яровой пшеницы в Нечерноземной зоне России способствует повышению продуктивности зерна при увеличении содержания гумуса с 1,5 до 2,5–2,7% и реакции почвенного раствора рН_{KCL} с 4,9 до 6,5–6,7.

В отношении метеорологических условий следует учесть, что минимальная прибавка урожайности зерна прогнозируется при существенном недостатке влаги в мае (ГТК=0,7-1,0). С ростом обеспеченности растений влагой (ГТК=1,3-1,8) увеличивается и зерновая продуктивность от инокуляции биопрепаратами и внесения азотного удобрения. Дальнейшее

увеличение выпадения осадков ($ГТК > 2,4$) приводит к снижению влияния указанных выше агроприемов на прибавку урожайности зерна. Такое влияние погодных условий на эффективность биопрепаратов и азотного удобрения возможно связано с обеспеченностью растений азотом, дефицит которого в периоды закладывания основных элементов урожайности (в Нечерноземной зоне России для яровой пшеницы это май месяц) критичен (Петр, 1990). При недостатке влаги и повышенных температурах воздуха минеральный азот плохо усваивается растениями (Сычев, Соколов, Шмырева, 2009; Гамзиков, 1981, 2013), а диазотрофы слабо влияют на продуктивность растений в начальные этапы его онтогенеза (Завалин, 2005). В условиях избыточного увлажнения дефицит азота обусловлен как процессами вымывания его в нижележащие слои корнеобитаемого слоя, так и уменьшением его количества из-за процесса денитрификации (Чан, 1984; Умаров, 1986).

Таблица 4.10

Окупаемость азотного удобрения прибавкой урожайности зерна яровой пшеницы (кг/кг) на дерново-подзолистых почвах от инокуляции семян биопрепаратами на основе ассоциативных диазотрофов в зависимости от содержания гумуса, значений pH_{KCL} и ГТК (май) (вариант: инокуляция БП + N на фоне РК-удобрений)

Гумус, %	pH_{KCL}	ГТК (май)					
		0,7-1,0	1,01-1,3	1,31-1,8	1,81-2,0	2,01-2,4	2,41-2,5
<1,5	<5,0	9,0	9,7	10,3	10,7	10,7	10,0
	5,0–5,5	9,7	10,3	11,0	11,3	11,3	10,7
	5,6–6,0	11,0	12,0	12,7	12,7	12,7	12,0
	6,1–6,5	13,0	14,0	14,7	14,7	14,7	14,0
	6,6–6,7	14,0	15,0	15,7	15,7	15,7	15,3
1,5–2,0	<5,0	10,0	10,7	11,3	11,7	11,7	11,0
	5,0–5,5	10,7	11,7	12,3	12,3	12,3	11,7
	5,6–6,0	12,0	13,0	13,7	13,7	13,7	13,0
	6,1–6,5	14,3	15,0	15,7	16,0	15,7	15,3
	6,6–6,7	15,3	15,7	16,7	17,0	16,7	16,3
2,01–2,5	<5,0	13,0	13,7	14,3	14,7	14,3	14,0
	5,0–5,5	13,7	14,3	15,0	15,3	15,3	14,7
	5,6–6,0	15,0	15,7	16,3	16,7	16,3	16,0
	6,1–6,5	17,0	17,7	18,3	18,7	18,3	18,0
	6,6–6,7	18,0	19,0	19,7	19,7	19,3	19,0
2,51–2,7	<5,0	14,3	15,3	16,0	16,0	16,0	15,7
	5,0–5,5	15,3	16,0	16,7	17,0	17,0	16,3
	5,6–6,0	16,7	17,3	18,0	18,3	18,0	17,7
	6,1–6,5	18,7	19,3	20,0	20,3	20,0	19,7
	6,6–6,7	19,7	20,7	21,3	21,3	21,0	20,7

Примечание: доза азотного удобрения 30 кг д.в. / га.

Подробное изучение данных прогноза прибавки урожайности зерна позволяет определить эффективность азотного удобрения на яровой пшенице при ее инокуляции биопрепаратами ассоциативных диазотрофов в зависимости от агрохимических свойств почв и метеорологических условий выращивания, при которых достигается их максимальная окупаемость (табл. 4.10). При неблагоприятных метеорологических

условиях (ГТК=0,7), содержании гумуса <1,5% и значениях рНКСЛ <5,0 окупаемость азотного удобрения составит не более 9,0 кг зерна / кг д.в. на 1 га. Улучшение агрохимических свойств почвы и оптимальные погодные условия периода вегетации способствуют росту окупаемости азотного удобрения в 2,4 раза – до 21,3 кг зерна / кг д.в. на 1 га.

Яровой ячмень. Данные анализа корреляционных связей в системе почва – погодные условия – растения – биопрепараты – азотное удобрение показали, что влияние факторов на изменчивость прибавки урожайности зерна ярового ячменя различается (табл. 4.11).

Связь прибавки урожайности ярового ячменя с показателями агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы и метеорологическими условиями при применении биологических препаратов на основе ризосферных ассоциативных микроорганизмов носит криволинейный характер. Среди изученных факторов существенная теснота связи отмечена для гумуса ($\eta_{yx}=0,56-0,75$), степени кислотности почвы ($\eta_{yx}=0,55-0,66$) и ГТК (май-июнь) ($\eta_{yx}=0,44-0,64$). Влияние метеорологических условий возделывания сельскохозяйственных культур на эффективность применения биопрепаратов в исследовании оценивали по гидротермическому коэффициенту. Расчеты корреляционных связей ГТК за разные периоды вегетации с прибавкой зерна от инокуляции биопрепаратами в основном можно охарактеризовать как слабые по тесноте. При оценке зависимости по коэффициенту корреляции имел место незначительный размах изменений величин этого показателя: 0,00–0,33, что говорит о слабой линейной связи между действием биопрепаратов и метеорологическими условиями. Определение корреляционного отношения для разных значений ГТК показало, что только с метеорологическими условиями за май-июнь отмечается средняя по тесноте связь ($\eta_{yx}=0,44$). Это объясняется биологическими особенностями культуры ячменя (короткий период поглощения питательных веществ из почвы, высокая требовательность к влаге в период кущение – колошение, которые приходятся в Нечерноземной зоне России на май-июнь) (Неттевич, Аниканова, Романова, 1981). Сильная криволинейная связь с ГТК за май-июнь ($\eta_{yx}=0,74$) установлена для совместного действия инокуляции биопрепаратами и азотного удобрения. Необходимо отметить, что установленные связи имели криволинейный характер, поэтому зависимость описывается уравнением вида параболы: $Y = ax^2 + bx + c$.

В целях выявления взаимного влияния микробных препаратов и азотных удобрений на урожайность зерна проанализированы статистические показатели для варианта применения минерального азотного удобрения в дозе N₃₀. Они показали, что при применении невысокой дозы азота (N₃₀) связь между степенью кислотности почвы и прибавкой урожайности ярового ячменя от внесения азотного удобрения оказалась незначительной. Существенное влияние на эффективность NH₄NO₃ оказывали содержание гумуса ($\eta_{yx}=0,66$) и метеорологические условия разных периодов вегетации (существенная нелинейная связь установлена с погодными условиями июня ($\eta_{yx}=0,63$), июля ($\eta_{yx}=0,59$), июня-июля ($\eta_{yx}=0,58$)).

Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы

Таблица 4.11

Связь прибавки урожайности зерна ячменя от инокуляции семян биопрепаратами и применения азотного удобрения с агрохимическими свойствами дерново-подзолистой почвы и погодными условиями

Аргументы системы	Вид корреляции						Значимость критерия линейности корреляции	
	Линейная			Криволинейная				
	коэффициенты		уровень значимости	корреляционное отношение, $\eta_{\text{кx}}$	коэффициент детерминации		Fф	Fт (0,05)
корреляции r	детерминации	уровень значимости			уровень значимости			
Действие биопрепаратов на фоне РК-удобрений								
Гумус, %	0,44	0,19	0,05	0,56	0,32	0,05	3,68	3,23
pH _{KCL}	0,45	0,20	0,05	0,66	0,43	0,05	7,79	3,23
ГТК (май)	-0,07*	0,00	0,05	0,30**	0,09	0,05	1,82	3,23
ГТК (июнь)	0,27*	0,07	0,05	0,44	0,20	0,05	2,97	3,23
ГТК (июль)	-0,33	0,11	0,05	0,37**	0,14	0,05	0,59	3,23
ГТК (май-июнь)	0,23*	0,05	0,05	0,44	0,20	0,05	3,46	3,23
ГТК (май-июль)	-0,10*	0,01	0,05	0,14**	0,02	0,05	0,17	3,23
ГТК (июнь-июль)	-0,07*	0,00	0,05	0,22**	0,05	0,05	0,90	3,23
ГТК (вег. пер.)	-0,20*	0,04	0,05	0,35	0,12	0,05	1,79	3,23
Действие азотного удобрения N ₃₀ на фоне РК-удобрений								
Гумус, %	-0,03*	0,00	0,05	0,66	0,44	0,05	15,11	3,23
pH _{KCL}	0,15*	0,02	0,05	0,25**	0,06	0,05	0,87	3,23
ГТК (май)	0,06*	0,00	0,05	0,23**	0,06	0,05	1,05	3,23
ГТК (июнь)	0,26*	0,07	0,05	0,63	0,39	0,05	6,71	3,23
ГТК (июль)	0,14*	0,02	0,05	0,59	0,35	0,05	10,12	3,23
ГТК (май-июнь)	0,28*	0,08	0,05	0,57	0,32	0,05	4,58	3,23
ГТК (май-июль)	0,30*	0,09	0,05	0,45	0,20	0,05	2,76	3,23
ГТК (июнь-июль)	0,24*	0,06	0,05	0,58	0,33	0,05	8,01	3,23
ГТК (вег. пер.)	0,20*	0,04	0,05	0,20**	0,04	0,05	0,05	3,23
Действие биопрепаратов на фоне N ₃₀ РК-удобрений								
Гумус, %	0,33	0,11	0,05	0,64	0,42	0,05	10,28	3,23
pH _{KCL}	0,58	0,33	0,05	0,66	0,43	0,05	3,32	3,23
ГТК (май)	0,11	0,01	0,05	0,08**	0,01	0,05	-0,11	3,23
ГТК (июнь)	0,29*	0,08	0,05	0,51	0,26	0,05	3,02	2,84
ГТК (июль)	-0,21*	0,04	0,05	0,38	0,15	0,05	2,41	3,23
ГТК (май-июнь)	0,33	0,11	0,05	0,70	0,49	0,05	9,29	3,23
ГТК (май-июль)	0,06*	0,00	0,05	0,19**	0,04	0,05	0,68	3,23
ГТК (июнь-июль)	0,02*	0,00	0,05	0,18**	0,03	0,05	0,61	3,23
ГТК (вег. пер.)	0,03*	0,00	0,05	0,30	0,09	0,05	1,94	3,23
Действие азотного удобрения в дозе N ₃₀ и биопрепаратов на фоне РК-удобрений								
Гумус, %	0,14*	0,02	0,05	0,75	0,57	0,05	24,75	3,23
pH _{KCL}	0,41	0,17	0,05	0,55	0,30	0,05	3,60	3,23
ГТК (май)	0,10*	0,00	0,05	0,16**	0,03	0,05	0,32	3,23
ГТК (июнь)	0,33	0,11	0,05	0,63	0,39	0,05	5,92	3,23
ГТК (июль)	-0,01*	0,00	0,05	0,50	0,25	0,05	6,57	3,23
ГТК (май-июнь)	0,37	0,14	0,05	0,74	0,54	0,05	11,18	2,84
ГТК (май-июль)	0,24*	0,06	0,05	0,40	0,16	0,05	2,48	3,23
ГТК (июнь-июль)	0,18*	0,03	0,05	0,47	0,22	0,05	4,78	3,23
ГТК (вег. пер.)	0,15*	0,02	0,05	0,13**	0,02	0,05	-0,13	3,23

* Значение коэффициента корреляции не существенно при 5% уровне значимости (значение критерия $t_{\text{ф}} < t_{\text{т}}$).

** Значение корреляционного отношения не существенно при 5% уровне значимости (значение критерия $t_{\text{ф}} < t_{\text{т}}$).

Дальнейший статистический анализ проведен аналогично как для яровой пшеницы. В соответствии с уравнением (3) (глава 2) в варианте РК-удобрений модель прогноза прибавки урожайности от инокуляции биопрепаратом выглядит следующим образом:

$$Y = (a_{13}x_4^2 + b_{13}x_4 + c_{13}) + (a_{14}x_5^2 + b_{14}x_5 + c_{14}) + (a_{15}x_6^2 + b_{15}x_6 + c_{15}) \quad (13)$$

Для варианта NPK-удобрений соответственно:

$$Y = (a_{16}x_4^2 + b_{16}x_4 + c_{16}) + (a_{17}x_5^2 + b_{17}x_5 + c_{17}) + (a_{18}x_6^2 + b_{18}x_6 + c_{18}) \quad (14)$$

Для варианта РК-удобрений модель прогноза прибавки урожайности от применения инокуляции биопрепаратом и азотного удобрения соответственно:

$$Y = (a_{19}x_4^2 + b_{19}x_4 + c_{19}) + (a_{20}x_5^2 + b_{20}x_5 + c_{20}) + (a_{21}x_6^2 + b_{21}x_6 + c_{21}) \quad (15)$$

где: x_4 – содержание гумуса, x_5 – pH_{KCL} , x_6 – ГТК (май-июнь), a_{13-21} , b_{13-21} – коэффициенты уравнения, c_{13-21} – свободные члены.

В представленных выборках данных средняя прибавка урожайности зерна ярового ячменя от применения биопрепаратов на фоне РК-удобрения составила 2,2 ц/га, на фоне NPK-удобрений – 3,1 ц/га. Средняя прибавка урожайности от совместного применения азотного удобрения и биопрепаратов на фоне РК-удобрения равнялась 6,8 ц/га. Принимая данные величины прибавки урожайности зерна ярового ячменя за 100%, в соответствии с предлагаемым Т.Н. Кулаковской (1990) методом комплексной оценки, так же как и для яровой пшеницы, рассчитан относительный вклад для каждого фактора (аргумента системы) по формуле (1) (глава 2).

Расчёты, характеризующие относительный и количественный вклад каждого фактора в формирование прибавки урожайности зерна ячменя в зависимости от гумуса, pH_{KCL} и ГТК (май-июнь), приведены в таблице 4.12. Существенный вклад в формирование прибавки урожайности ячменя оказывают такие факторы, как содержание гумуса (относительный вклад 31–40%) и pH_{KCL} (21–45%), менее значительное, но достоверное при 5% уровне значимости – ГТК за май-июнь (21–39%).

Таблица 4.12

Факторы модели и их вклад в формирование прибавки урожайности зерна ячменя на дерново-подзолистых почвах Нечерноземной зоны Центральных районов России

Факторы	η_{ix}^2	Относительный вклад, %	Прибавка урожая зерна, ц/га	Количественный вклад факторов, ц/га
Действие биопрепаратов на фоне РК удобрений				
Гумус, %	0,32	34	2,2	0,8
pH_{KCL}	0,43	45		1,0
ГТК (май-июнь)	0,20	21		0,4
Σ	0,95	100		2,2

**Ассоциативный азот, урожай
и устойчивость агроэкосистемы**

Действие биопрепаратов на фоне N ₃₀ PK				
Гумус, %	0,42	31	3,1	1,0
pH _{KCL}	0,43	32		1,0
ГТК (май-июнь)	0,49	37		1,1
Σ	1,34	100		3,1
Действие азотного удобрения в дозе N ₃₀ и биопрепаратов на фоне PK				
Гумус, %	0,57	40	6,8	2,7
pH _{KCL}	0,30	21		1,4
ГТК (май-июнь)	0,54	39		2,8
Σ	1,41	100		6,8

На следующем этапе в соответствии с аппроксимационными алгоритмами выведены уравнения регрессии отдельно для каждого аргумента системы (табл. 4.13). Выявленные особенности корреляционных связей (уравнения) использованы как теоретическое обоснование для корректного описания количественной изменчивости прибавки урожайности яровой пшеницы от инокуляции биопрепаратами под влиянием агрохимических факторов почвенного плодородия и метеорологических условий.

По уравнениям регрессии рассчитывался количественный вклад по отдельным аргументам системы, а далее – суммарный вклад содержания гумуса, pH_{KCL} и ГТК (май-июнь) в формировании прибавки урожайности ячменя с учетом их вариабельности.

Таблица 4.13
Зависимости прибавки урожайности зерна ярового ячменя, возделываемого на дерново-подзолистой почве, при инокуляции биопрепаратами

Факторы	Уравнение регрессии	η _{yx}
Действие биопрепаратов на фоне PK удобрений		
Гумус, %	$Y = -0,312X^2 + 1,73X - 1,645$	0,56
pH _{KCL}	$Y = -0,2784X^2 + 3,6818X - 11,1791$	0,66
ГТК (май-июнь)	$Y = -0,457X^2 + 1,420X - 0,642$	0,44
Действие биопрепаратов на фоне NPK удобрений		
Гумус, %	$Y = -0,4833X^2 + 2,5944X - 2,5218$	0,64
pH _{KCL}	$Y = 0,2005X^2 - 1,8852X + 4,6162$	0,66
ГТК (май-июнь)	$Y = -1,0758X^2 + 3,6857X - 2,0165$	0,70
Действие азотного удобрения и биопрепаратов на фоне PK удобрений		
Гумус, %	$Y = -1,70X^2 + 8,347X - 7,543$	0,75
pH _{KCL}	$Y = 0,2091X^2 - 1,9176X + 4,9676$	0,55
ГТК (май-июнь)	$Y = -2,6051X^2 + 8,6720X - 4,5736$	0,74

Расчет прогноза показал, что увеличение содержания гумуса в почве с 1,5 до 2,5% сопровождалось ростом прибавки урожайности ячменя. Наибольшая прибавка урожая зерна от инокуляции препаратами ризосферных ассоциативных diaзотрофов отмечена при содержании гумуса 2,5–2,7%. Рост прибавки урожайности при применении биопрепаратов

прогнозируется при увеличении содержания гумуса до 2,5%, в дальнейшем увеличение органического вещества почвы не влияет на эффективность препаратов diaзотрофов.

На основе вклада отдельных факторов рассчитывали прибавки урожайности зерна ячменя при его инокуляции биопрепаратами на фоне РК-удобрений с учетом вариации гумуса, рН_{КСL} и ГТК. Итоговые данные в виде прогноза представлены в таблице 4.14.

Максимальная эффективность от применения биопрепаратов на ячмене получена при нейтральной реакции почвенной среды (рН_{КСL} 6,1–6,7). С ростом кислотности почвы до 4,9 прибавка зерна снижается.

Расчет влияния метеорологических условий за май-июнь на действие биопрепаратов в представленной модели показал, что наибольшие прибавки урожайности зерна ячменя возможны при ГТК за май-июнь = 1,3–1,8 (влажные условия увлажнения).

Таблица 4.14.

Прогноз прибавки урожайности зерна ярового ячменя на дерново-подзолистых почвах от применения биопрепаратов на основе ассоциативных diaзотрофов в зависимости от содержания гумуса, значений рН_{КСL} и ГТК (май-июнь) (вариант: инокуляция БП на фоне внесения РК-удобрений)

Гумус, %	рН _{КСL}	Урожай- ность на РК фоне, ц/га	ГТК (май-июнь)					
			0,7-0,8	0,81-1,0	1,01-1,3	1,31-1,8	1,81-1,99	2,0-2,6
<1,5	<5,0	5,1	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7
	5,0–5,5	6,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,2
	5,6–6,0	9,1	1,3	1,3	1,4	1,5	1,5	1,4
	6,1–6,7	11,2	1,4	1,4	1,5	1,6	1,6	1,5
1,5–2,0	<5,0	6,8	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,1
	5,0–5,5	9,2	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,6
	5,6–6,0	13,9	1,7	1,7	1,8	1,9	1,9	1,8
	6,1–6,7	17,0	1,8	1,8	1,9	2,0	2,0	1,9
2,01– 2,5	<5,0	9,8	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3	1,3
	5,0–5,5	12,8	1,6	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8
	5,6–6,0	16,2	1,8	1,9	2,0	2,1	2,1	2,0
	6,1–6,7	22,1	1,9	2,0	2,2	2,2	2,2	2,1
2,51– 2,7	<5,0	11,6	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,3
	5,0–5,5	15,8	1,6	1,7	1,8	1,9	1,8	1,8
	5,6–6,0	21,9	1,8	1,9	2,0	2,1	2,1	2,0
	6,1–6,7	23,4	1,9	2,0	2,1	2,2	2,2	2,1

В целях усовершенствования технологий выращивания ячменя нами также предлагается вероятный прогноз изменения прибавки урожайности зерна ячменя при его инокуляции биопрепаратами на фоне внесения полного минерального удобрения (табл. 4.15). В отличие от варианта РК-удобрений внесение невысоких доз азотных удобрений несколько корректирует прогноз. Так, в прогнозе максимальная прибавка урожайности ячменя может быть получена при ГТК (май-июнь) = 1,3–1,8. С увеличением значений ГТК (май-июнь) до 2,0 уже идет некоторое снижение эффективности биопрепаратов, а существенное снижение их эффективности происходит при росте ГТК за май-июнь с 2,0 до 2,6.

На NPK-фоне рост положительного влияния биопрепаратов прогнозируется не только при увеличении содержания гумуса до 2,5%, и его дальнейшем увеличении до 2,7%.

Действие реакции почвенного раствора на эффективность биопрепаратов на NPK-фоне аналогично таковым в варианте РК-удобрений – с увеличением кислотности почвы до 4,9 прибавка урожайности зерна ячменя снижается. Максимальная эффективность от применения биопрепаратов на ячмене получена при нейтральной реакции почвенной среды (рН_{ксл} 6,1–6,7).

Таблица 4.15

Прогноз прибавки урожайности зерна ячменя на дерново-подзолистых почвах от применения биопрепаратов на основе ассоциативных diaзотрофов в зависимости от содержания гумуса, значений рН_{ксл} и ГТК (май-июнь) (вариант: инокуляция БП на фоне внесения NPK-удобрений)

Гумус, %	рН _{ксл}	Урожай- ность на NPK фоне, ц/га	ГТК (май-июнь)					
			0,7-0,8	0,81-1,0	1,01-1,3	1,31-1,8	1,81-1,99	2,0-2,6
<1,5	<5,0	5,4	0,6	0,8	1,3	1,5	1,4	0,7
	5,0–5,5	7,5	0,7	0,9	1,4	1,6	1,5	0,8
	5,6–6,0	10,1	0,9	1,1	1,6	1,8	1,7	1,0
	6,1–6,7	13,0	1,4	1,6	2,1	2,3	2,2	1,4
1,5–2,0	<5,0	7,8	1,2	1,4	1,7	2,1	2,0	1,2
	5,0–5,5	11,1	1,3	1,5	1,8	2,2	2,1	1,3
	5,6–6,0	16,2	1,5	1,7	2,0	2,4	2,3	1,6
	6,1–6,7	19,4	2,0	2,3	2,7	2,9	2,8	2,0
2,01– 2,5	<5,0	11,9	1,4	1,6	1,9	2,3	2,2	1,4
	5,0–5,5	15,4	1,5	1,7	2,0	2,4	2,3	1,6
	5,6–6,0	19,2	1,7	1,9	2,2	2,6	2,5	1,8
	6,1–6,7	25,4	2,2	2,4	2,7	3,0	2,9	2,2
2,51– 2,7	<5,0	14,6	1,4	1,6	1,9	2,3	2,2	1,5
	5,0–5,5	18,9	1,5	1,7	2,0	2,4	2,4	1,6
	5,6–6,0	24,1	1,7	1,9	2,2	2,6	2,6	1,8
	6,1–6,7	26,1	2,2	2,5	2,9	3,1	3,1	2,2

Результаты расчетов прогноза (табл. 4.16) показали, что увеличение содержания гумуса в почве с 1,5 до 2,5% сопровождалось ростом прибавки урожайности ярового ячменя. Наибольшая прибавка урожая зерна от инокуляции препаратами ризосферных ассоциативных diaзотрофов отмечена при содержании гумуса 2,5%. В дальнейшем увеличение содержания гумуса на дерново-подзолистой почве до 2,7% не приводит к росту прибавки урожайности зерна ячменя от инокуляции семян биопрепаратами при внесении азотного удобрения.

Разработка современных технологий возделывания ячменя для условий Нечерноземной зоны России требует установления эффективности одновременного применения азотного удобрения и биопрепаратов микроорганизмов, выполняющих фиксацию атмосферного азота как дополнительного источника этого элемента в посевах небобовых культур. Используя методы построения концептуальных моделей в алгебраической форме (аппроксимационная формула) (Прошкин, 2012), нами составлен прогноз прибавки

урожайности зерна ячменя от действия азотного удобрения и инокуляции биопрепаратами диазотрофов (табл. 4.16).

Таблица 4.16

Прогноз прибавки урожайности зерна ячменя на дерново-подзолистых почвах от применения азотного удобрения и биопрепаратов на основе ассоциативных диазотрофов в зависимости от содержания гумуса, значений рН_{KCl} и ГТК (май-июнь) (вариант: инокуляция БП + N на фоне РК-удобрений)

Гумус, %	рН _{KCl}	Урожай- ность на РК фоне, ц/га	ГТК (май-июнь)					
			0,7-0,8	0,81-1,0	1,01-1,3	1,31-1,8	1,81-1,99	2,0-2,6
<1,5	<5,0	5,1	2,1	2,5	3,2	4,0	3,8	1,8
	5,0–5,5	6,9	2,3	2,7	3,4	4,2	3,9	1,9
	5,6–6,0	9,1	2,5	2,9	3,6	4,4	4,2	2,2
	6,1–6,7	11,2	2,9	3,4	4,0	4,9	4,6	2,6
1,5–2,0	<5,0	6,8	3,6	4,1	4,8	5,6	5,3	3,3
	5,0–5,5	9,2	3,8	4,2	4,9	5,7	5,5	3,5
	5,6–6,0	13,9	4,0	4,5	5,2	6,0	5,7	3,7
	6,1–6,7	17,0	4,5	5,3	6,1	6,4	6,1	4,1
2,01– 2,5	<5,0	9,8	4,0	4,4	5,1	5,9	5,7	3,7
	5,0–5,5	12,8	4,1	4,6	5,3	6,1	5,8	3,8
	5,6–6,0	16,2	4,4	4,8	5,5	6,3	6,1	4,1
	6,1–6,7	22,1	4,8	5,2	5,9	6,8	6,5	4,5
2,51– 2,7	<5,0	11,6	4,0	4,4	5,1	5,9	5,6	3,6
	5,0–5,5	15,8	4,1	4,5	5,2	6,1	5,8	3,8
	5,6–6,0	21,9	4,4	4,8	5,5	6,3	6,0	4,0
	6,1–6,7	23,4	4,8	5,2	5,9	6,7	6,5	4,5

Максимальная эффективность от применения биопрепаратов на яровом ячмене может быть получена при нейтральной реакции почвенной среды (рН_{KCl} 6,5–6,7). При увеличении кислотности почвы до 4,9 прибавка прогнозно снижалась на 20%.

Расчет влияния метеорологических условий мая-июня на действие биопрепаратов и азотного удобрения в представленной модели показал, что наибольшие прибавки урожайности зерна ярового ячменя отмечены от оптимального до повышенного увлажнения (ГТК за май-июнь =1,3–1,8). В засушливые годы (ГТК за май-июнь <0,8) или при избыточном увлажнении (ГТК за май-июнь >1,8) наступал перегиб функции и эффективность совместного применения микробных биопрепаратов и минерального азотного удобрения снижается. При значительном увлажнении (ГТК за май-июнь >2,0) эффект от инокуляции микробных биопрепаратов ярового ячменя и применения минерального азотного удобрения снижается наиболее существенно (на 35–50%).

В прогнозе прибавка урожайности ярового ячменя при внесении минеральных азотных удобрений и биопрепаратов повышалась при увеличении содержания гумуса, рН_{KCl} к нейтральному значению и оптимальных показателях ГТК (май-июнь) более чем в 3 раза, с 2,1 до 6,8 ц/га.

Разработанная математическая модель и составленный на ее основе прогноз прибавки урожайности ярового ячменя при инокуляции биопре-

паратами ассоциативных diaзотрофов и азотного удобрения позволяют определить их возможную эффективность по результатам агрохимического обследования дерново-подзолистых почв и расчетам гидротермического коэффициента метеорологических условий года.

При инокулировании семян ярового ячменя препаратами ассоциативных diaзотрофов образующийся ассоциативный азот рассматривается нами как дополнительный источник питания. Используя прогноз прибавки урожайности зерна в варианте инокуляция БП + N на фоне РК-удобрений, можно определить окупаемость применения азотного удобрения в зависимости от агрохимических свойств почв и метеорологических условий выращивания (табл. 4.17). При неблагоприятных метеорологических условиях (ГТК=0,7), содержании гумуса <1,5% и значениях рН_{ксл} <5,0 окупаемость азотного удобрения составила не более 7,0 кг зерна / кг д.в. на 1 га. Улучшение агрохимических свойств почвы и оптимальные погодные условия вегетационного периода способствуют росту окупаемости азотного удобрения в 3,2 раза – до 22,7 кг зерна / кг д.в. на 1 га.

Таблица 4.17

Окупаемость азотного удобрения прибавкой урожайности зерна ячменя (кг/кг) на дерново-подзолистых почвах от инокуляции семян биопрепаратами на основе ассоциативных diaзотрофов в зависимости от содержания гумуса, значений рН_{ксл} и ГТК (май-июнь)
(вариант: инокуляция БП + N на фоне РК-удобрений)

Гумус, %	рН _{ксл}	ГТК (май-июнь)					
		0,7-0,8	0,81-1,0	1,01-1,3	1,31-1,8	1,81-1,99	2,0-2,6
<1,5	<5,0	7,0	8,3	10,7	13,3	12,7	6,0
	5,0–5,5	7,7	9,0	11,3	14,0	13,0	6,3
	5,6–6,0	8,3	9,7	12,0	14,7	14,0	7,3
	6,1–6,7	9,7	11,3	13,3	16,3	15,3	8,7
1,5–2,0	<5,0	12,0	13,7	16,0	18,7	17,7	11,0
	5,0–5,5	12,7	14,0	16,3	19,0	18,3	11,7
	5,6–6,0	13,3	15,0	17,3	20,0	19,0	12,3
	6,1–6,7	15,0	17,7	20,3	21,3	20,3	13,7
2,01– 2,5	<5,0	13,3	14,7	17,0	19,7	19,0	12,3
	5,0–5,5	13,7	15,3	17,7	20,3	19,3	12,7
	5,6–6,0	14,7	16,0	18,3	21,0	20,3	13,7
	6,1–6,7	16,0	17,3	19,7	22,7	21,7	15,0
2,51– 2,7	<5,0	13,3	14,7	17,0	19,7	18,7	12,0
	5,0–5,5	13,7	15,0	17,3	20,3	19,3	12,7
	5,6–6,0	14,7	16,0	18,3	21,0	20,0	13,3
	6,1–6,7	16,0	17,3	19,7	22,3	21,7	15,0

Примечание: доза азотного удобрения 30 кг д.в. / га.

Полученные данные могут найти широкое применение в практике рационального использования биопрепаратов на основе ассоциативных diaзотрофов и азотных удобрений. Они дают возможность составить прогноз экономической эффективности применения биопрепаратов как отдельно, так и в сочетании с азотными удобрениями, вносимыми под основные яровые зерновые культуры на почвах Нечерноземной зоны Европейской части России.

Таким образом, применение биологических препаратов на основе штаммов ассоциативных микроорганизмов отдельно и при внесении азотных удобрений на яровых пшенице и ячмене на дерново-подзолистых почвах является важным фактором в повышении урожайности зерна. С целью установления рекомендаций для производства нами предложены модели прогноза прибавки урожайности яровых зерновых (пшеница, ячмень) с учетом отдельных агрохимических показателей плодородия почвы и метеорологических условий вегетации для центральных районов Нечерноземной зоны России.

На основании исследований выявлена достоверная криволинейная зависимость ($F_{\phi} > F_{0,05}$) между величиной прибавки урожайности зерна яровых пшеницы и ячменя от инокуляции биопрепаратами diaзотрофов и агрохимическими показателями плодородия почвы: содержанием гумуса, pH_{KCL} .

Установлена тесная криволинейная зависимость ($F_{\phi} > F_{0,05}$) между величиной прибавки урожайности зерна от биопрепаратов и метеорологическими условиями возделывания яровых зерновых: на яровой пшенице – с погодными условиями мая месяца, ячмене – с погодными условиями периода май-июнь. Между прибавкой урожайности от инокуляции биопрепаратами и значениями ГТК за июнь, июль, май-июль, июнь-июль, период вегетации оказался несущественным ($t_{\phi} < t_{\tau}$). На яровом ячмене связь между значениями ГТК за май, июль, май-июль, июнь-июль, период вегетации и прибавкой урожайности от инокуляции биопрепаратами оказалась также несущественной ($t_{\phi} < t_{\tau}$).

Обобщение и статистическая обработка результатов многочисленных полевых опытов позволили выявить влияние комплекса агрохимических свойств почвы и погодных условий на эффективность биопрепаратов на основе ассоциативных diaзотрофов, применяемых на яровой пшенице, установить форму и оценить тесноту связи между содержанием гумуса, степенью кислотности почвы и ГТК.

Результаты корреляционного анализа экспериментальных данных показали, что величина прибавки урожайности зерна яровой пшеницы от инокуляции биопрепаратами наиболее тесно связана с содержанием гумуса, величиной pH_{KCL} и значением гидротермического коэффициента в мае. Связь между значениями ГТК за июнь, июль, май-июнь, май-июль, период вегетации и прибавкой урожайности оказалась несущественной ($t_{\phi} < t_{\tau}$).

Наибольшую прибавку урожайности зерна яровой пшеницы от инокуляции биопрепаратами (+3 ц/га) на дерново-подзолистых почвах Европейской части России можно получать при содержании гумуса 2,5–2,7%, нейтральной реакции почвенной среды (pH_{KCL} 6,5–6,7) и оптимальном увлажнении в мае (ГТК за май =1,0–1,3). При недостатке влаги (ГТК за май <0,8) или избыточном увлажнении (ГТК за май >1,8) эффективность препаратов на основе ризосферных ассоциативных diaзотрофов снижается.

Результаты анализа экспериментальных данных 43 полевых наблюдений показали, что величина прибавки урожайности зерна ярового ячменя от инокуляции биопрепаратами (отдельно и совместно с азотными удобрениями) на дерново-подзолистых почвах Европейской части России

наиболее тесно связана с содержанием гумуса, величиной pH_{KCl} и значением гидротермического коэффициента в мае-июне. Связь между значениями ГТК за май, июль, май-июль, июнь-июль, период вегетации и прибавкой урожайности оказалась несущественной ($t_f < t_i$).

Наибольшую прибавку урожайности зерна ярового ячменя от инокуляции биопрепаратами на фоне РК-удобрений можно получить при содержании гумуса 2,5–2,7%, нейтральной реакции почвенной среды (pH_{KCl} 6,1–6,7) и увлажнении в мае-июне (ГТК за май-июнь = 1,3–1,8).

Глава 5. Эффективность применения азотного удобрения, сидерата и биопрепарата Ризоагрин под яровую пшеницу

С целью определения роли различных источников азота (N удобрения, N биологический, N почвы и «экстра»-азот) в формировании урожая зерновых культур и установлению количественных параметров трансформации азота при возделывании сельскохозяйственных культур, которые необходимы для предложения производству агроэкономически и экологически обоснованных параметров внесения удобрений, проводили микрополевой опыт с использованием метода изотопной индикации с применением стабильного изотопа азота ^{15}N . Исследования в опыте проводили на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве Смоленской области со следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса (по Тюрину) – 1,98–2,04%; pH_{KCl} = 5,1–5,2; содержание подвижных форм P_2O_5 и K_2O (по Кирсанову) – соответственно 57,6–67,8 и 153,1–161,4 мг/кг почвы.

Урожайность зерна яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Злата. варьировала в годы проведения исследований в зависимости от складывающихся гидротермических условий весенне-летнего периода вегетации и комбинаций применяемых удобрений и биопрепарата и изменяясь от 3,29 до 13,62 г/сосуд (таблица 5.1). Без минерального азота на фоне РК-удобрений урожайность зерна изменялась на 8–33% от среднего значения. Такие колебания обусловлены метеорологическими условиями выращивания. В варианте применения фосфорных и калийных удобрений более высокая урожайность получена при достаточном обеспечении яровой пшеницы влагой в период интенсивного роста растений (май-июнь), что отмечалось в 2014 году. Засушливые условия 2015 года (ГТК за периоды: всходы – выход в трубку равен 0,64, цветение – налив зерна равен 0,92) привели к существенному снижению урожая зерна на 33%, что связано с дефицитом воды, который относится к решающим факторам снижения процесса ассимиляции у зерновых (Петр, 1990).

Повышение продуктивности сельскохозяйственных культур тесным образом связано с применением минеральных и органических удобрений, их сочетанием, а также с процессами их превращения в почве. В опыте при посеве яровой пшеницы по фону внесения аммиачной селитры

урожайность зерна возрастала в зависимости от погодных условий на 30–69%, или в среднем за три года от этого приема составила +42%. Внесение сидерата горчицы белой способствовало большему по сравнению с аммиачной селитрой сбору зерна за 2014–2016 гг. – в среднем на 58% к контролю. Это связано с более высокой дозой применения азота, а также с тем, что при внесении фитомассы растений-сидератов в почву поступает целый комплекс специфических органических соединений (белки, углеводы, витамины, аминокислоты, жиры, соли), которые оказывают непосредственное действие на трансформацию азота в почве, активно включаясь в биосинтез микробной массы (Завалин, Соколов, 2016; Шмырева, Соколов, Цуриков, 2012).

Таблица 5.1

Влияние азотного удобрения, сидерата и Ризоагина на урожайность зерна яровой пшеницы (Смоленская область, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва)

Вариант	Урожайность зерна, г/сосуд				Прибавка к контролю (средняя за 3 года)	
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	Средняя	г/сосуд	%
1. Фон – P ₆₀ K ₆₀ (Ф) - контроль	5,86	3,29	4,05	4,40	–	–
2. Ф + Биомасса сидерата (БМ)	9,69	4,73	6,48	6,96	2,56	58,2
3. Ф + N ₄₅	7,59	5,56	5,64	6,26	1,86	42,3
4. Ф + БМ + N ₄₅	11,80	6,56	7,92	8,76	4,36	99,1
5. Ф + Ризоагин (РА)	7,00	3,51	4,71	5,08	0,68	15,5
6. Ф + БМ + РА	10,93	5,59	6,89	7,80	3,40	77,3
7. Ф + N ₄₅ + РА	10,39	6,28	6,39	7,69	3,29	74,8
8. Ф + БМ + N ₄₅ + РА	13,62	7,28	8,20	9,70	5,30	120,5
Р, %	4,42	3,00	2,64	3,12	3,12	3,1
НСР ₀₅ для частных различий	1,53	0,49	0,48	0,57	0,57	13,0
НСР ₀₅ для главных факторов	0,77	0,30	0,24	0,28	0,28	6,4
НСР ₀₅ для взаимодействий	1,08	0,35	0,34	0,40	0,40	9,1

Примечание: опыт проводили в сосудах без дна площадью 0,018 м²; предшественник: картофель.

Совместное применение растительной массы горчицы и аммиачной селитры в опыте дало наибольшую прибавку + 99% с варьированием по годам исследований в зависимости от метеорологических условий выращивания 96–101%.

Условия обеспечения влагой в период вегетации (особенно в начальный период роста растений) существенно сказываются на эффективности применения биомассы сидерата. Дефицит влаги снижает эффективность (Довбан, 2009). Недостаток влаги в начале вегетации яровой пшеницы в 2015 году (ГТК за май-июнь = 0,6–0,7) способствовал тому, что применение сидерата уступало действию азотного удобрения (прибавка от биомассы сидерата составила +44 %, а от азотного удобрения – +69%. Достаточное или избыточное увлажнение посевов в период вегетации (2014 и 2016 гг.) способствовало тому, что прибавка от сидерата превосходила эффект от минерального азота и составляла 60–65% (от аммиачной селитры – 30–39%). Это может объясняться усилением микробиологической

минерализации растительной массы (аммонификаторы, аэробные целлюлозные микроорганизмы, денитрификаторы, нитрификаторы), деятельность которой в большей степени зависит от температурно-водного режима почвы. Оптимальные условия в Нечерноземной зоне для развития микрофлоры складываются при температурном интервале 20–30 °С и влажности 60% от полной влагоемкости (Мишустин, 1975; Умаров, 1986; Емцев, Ницэ и др., 1985; Емцев, Мишустин, 2005).

Благодаря улучшению азотного питания яровой пшеницы при совместном применении органического и минерального удобрений происходило существенное увеличение формирования вегетационной массы растений и, как следствие, значительный рост урожайности зерна – в среднем за 3 года до 8,76 г/сосуд или в 2 раза по сравнению с РК-фоном.

При инокуляции посевного материала яровой пшеницы Ризоагрином на фоне Р60К60 отмечали прибавку урожайности зерна в среднем на 16%, с варьированием: +7% в жаркий и засушливый вегетационный период (2015 г.) – действие Ризоагрина было незначительным; в условиях избыточного увлажнения почвы (2016 год) – прибавка от инокуляции составила 16%; при оптимальных метеорологических условиях периода вегетации – +19%. В целом прибавка от применения Ризоагрина уступала действию как азотного удобрения, так и сидерата, что говорит о невозможности замены органических и минеральных удобрений биологическими препаратами. Такое варьирование действия микроорганизмов, входящих в состав Ризоагрина, объясняется тем, что определенного устойчивого пути колонизации корней диазототрофами в полевых условиях не существует и бактериальная колонизация сильно зависит от условий окружающей среды (метеорологические условия, содержание гумуса и питательных элементов, величина рН, влажность почвы и др.) и конкуренции с другими штаммами или родной микробиотой. Это объясняет отсутствие в отдельные годы положительных результатов эффективности ассоциативных диазототрофов на продуктивность культурных растений (Skonieski et al., 2017).

Применение биопрепарата на основе ассоциативных азотфиксаторов в сочетании с минеральным азотным удобрением способствовало росту урожайности зерна яровой пшеницы на 74% по сравнению с контролем. Эффективность минерального удобрения при применении Ризоагрина на дерново-подзолистой почве по сравнению с вариантом РК+ N возрастала на 23%. Усиление эффектов от совместного применения биопрепарата и азотного удобрения, по-видимому, связано с тем, что растения потребляют азот минерального удобрения в начальный период вегетации, когда активность азотфиксирующих бактерий еще относительно не велика из-за недостаточного прогрева почвы и малого количества корневых выделений, а биологический азот, накопленный ассоциативными азотфиксаторами – на более поздних этапах развития растений, когда доступного азота удобрений уже не осталось (Завалин, 2005, Кудяров, 1991). На более поздних фазах развития (начиная с фазы выхода в трубку) удобренные растения яровой пшеницы с более развитой корневой системой и более высоким уровнем обмена веществ активизируют микробиологическую активность в ризосфере растений, в результате чего и сама культура получает кроме

азота и стимуляторы роста – продукты жизнедеятельности diaзотрофов, усиливающие продуктивность культурного растения (Шотт, 2007).

При относительно невысоком содержании в почве гумуса внесение органических удобрений позволяет улучшить водный баланс дерново-подзолистой почвы, повысить микробиологическую активность и обеспечить растения легкодоступными элементами питания (Минеев, Дебреценни, Мазур, 1993). Внесение биомассы сидерата под яровую пшеницу и инокуляция ее семян Ризоагином за годы исследований способствовали росту урожайности зерна в среднем на 77% к контролю, с колебаниями по годам +70% в 2015 г. до +87% в 2014 г. Зерновая продуктивность яровой пшеницы на делянках с биомассой сидерата возрастала при инокуляции биопрепаратом в среднем на +12% к варианту РК+БМ. В большей степени положительный эффект наблюдался в условиях оптимального увлажнения или при недостатке влаги (+13...18%). При избыточном увлажнении в период вегетации эффект снижался (+6%). Положительное действие биопрепаратов при применении биомассы сидерата объясняется тем, что внесение свежего органического вещества способствует интенсивному развитию корневой системы растений, увеличению выделения экссудатов, повышает эффективность и устойчивость действия биопрепаратов (Лукин, Марчук, 2011).

Инокуляция семян яровой пшеницы препаратом ассоциативных микроорганизмов и применение биомассы горчицы, азотного удобрения дает весьма существенный положительный эффект: при оптимальном увлажнении +132%, в засушливых условиях выращивания яровой пшеницы – 121%, при избыточном увлажнении – 102%, что, по-видимому, объясняется не только дополнительным обеспечением яровой пшеницы фиксированным азотом, но и повышением стрессоустойчивости культурного растения от биопрепарата (Тихонович, Кожемяков, Чеботарь и др., 2005).

К сортовым особенностям зерновых культур относится соотношение основной (зерно) и побочной (солома) продукции в структуре урожая, на которые из абиотических и биотических факторов в большей степени влияют условия увлажнения и в меньшей степени условия минерального питания (Коновалов, 1981; Завалин, 2003; Никитин, 2015). Улучшение азотного питания способствует созданию благоприятных условий для формирования фитомассы растений в период вегетации и в итоге приводит к повышению урожайности зерна и соломы (Климашевский, 1991).

Сбор соломы у яровой пшеницы в микрополевым опыте в различные годы изменялся от 6,39 до 16,53 г/сосуд (таблица 5.2). На фоне применения фосфорных и калийных удобрений в зависимости от метеорологических условий периода вегетации масса соломы яровой пшеницы изменялась на 12–24% от среднего значения. Наибольший сбор соломы отмечен при оптимальных условиях обеспечения культурного растения теплом и влагой. Недостаток влаги, как и ее избыток, приводил к снижению получения побочной продукции примерно на треть. Улучшение условий питания растений яровой пшеницы (внесение биомассы сидерата или минерального азотного удобрения) способствовало росту вегетационной массы культуры

и, как следствие, увеличению сбора соломы в среднем за три года исследований на 43–46%. Достоверные различия между вариантами применения сидерата и азотного удобрения в опыте установлены только в 2015 году, когда в условиях недостаточного увлажнения в период вегетации (особенно в июне-июле) эффект от применения биомассы сидерата отмечен существенно меньше, чем от азотного удобрения, что объясняется особенностями использования азота из органических удобрений (недостаточная микробиологическая минерализация азота в условиях дефицита влаги в почве). При оптимальном увлажнении растений яровой пшеницы в период интенсивного роста (2014 год) наблюдался несколько больший урожай соломы на фоне применения сидерата, чем таковой эффект от аммиачной селитры (от сидерата – 54%, от аммиачной селитры – 45%), что объясняется особенностями использования азота из органических удобрений и дозой азота (с биомассой в почву вносилось больше азота, чем с аммиачной селитрой).

Таблица 5.2
Влияние азотного удобрения, сидерата и Ризоагрина
на массу соломы яровой пшеницы (2014–2016 гг.)

Вариант	Масса соломы, г/сосуд				Прибавка к контролю (средняя за 3 года)	
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	Средняя	г/сосуд	%
1. Фон – P ₆₀ K ₆₀ (Ф) - контроль	9,02	6,39	6,43	7,28	–	–
2. Ф + Биомасса сидерата (БМ)	13,85	8,78	9,16	10,60	3,32	45,6
3. Ф + N ₄₅	13,05	9,46	8,82	10,44	3,16	43,4
4. Ф + БМ + N ₄₅	16,53	10,21	12,41	13,05	5,77	79,3
5. Ф + Ризоагрин (РА)	10,35	6,81	7,07	8,08	0,80	11,0
6. Ф + БМ + РА	15,33	9,94	8,95	11,40	4,12	56,6
7. Ф + N ₄₅ + РА	12,14	10,54	9,83	10,83	3,55	48,8
8. Ф + БМ + N ₄₅ + РА	15,71	11,07	12,53	13,10	5,82	79,9
R, %	4,85	3,06	2,24	3,37	3,37	3,4
НСР ₀₅ для частных различий	3,11	1,09	0,64	0,90	0,90	12,4
НСР ₀₅ для главных факторов	1,56	0,55	0,32	0,45	0,45	6,2
НСР ₀₅ для взаимодействий	2,20	0,77	0,45	0,64	0,64	8,8

Во все годы проведения опыта улучшение условий минерального питания растений в результате применения сидерата, минеральных удобрений и биопрепаратов способствовало повышению массы соломы. В среднем за три года сбор соломы в результате использования перечисленных выше агрохимикатов и биопрепарата увеличивался на 80%.

Высев семян яровой пшеницы, инокулированных Ризоагрином, в результате положительного его влияния на культурные растения, заключающегося в улучшении минерального питания и биоконтрольном действии, обеспечил условия для формирования более высокой массы соломы (Тихонович, Кожемяков, Чеботарь и др., 2005; Завалин, 2005). В среднем за годы проведения эксперимента прибавка от применения биопрепарата Ризоагрина составила 11% на фоне РК-удобрений. В варианте применения под яровую пшеницу сидерата инокуляция Ризоагрином способствовала достоверному увеличению сбора соломы в среднем за три года на 8%. В условиях избы-

точного увлажнения на фоне сидерата положительного действия от Ризоагина не наблюдалось.

Применение Ризоагина совместно с аммиачной селитрой в среднем за три года не дало достоверного положительного эффекта на сбор соломы. Наблюдалась тенденция к некоторому увеличению массы побочной продукции (в среднем на 4%). Положительное действие Ризоагина на фоне аммиачной селитры отмечалось в стрессовых для растений яровой пшеницы условиях (2015 и 2016 гг.), прибавка составила +11–12%.

Данные, полученные в результате проведения микрополевого опыта, позволяют судить и о действии изучаемых факторов на значение хозяйственного коэффициента (доля зерна в общей надземной массе), который является одним из показателей продуктивности (Павлов, 1984) (таблица 5.3). Существенное влияние на значение хозяйственного коэффициента в первую очередь оказывали погодные условия периода вегетации. В условиях достаточного увлажнения и температур, близких к среднемноголетнему значению (2014 г.), отмечалось наибольшее значение данного показателя – в основном варьирование K_x находилось в пределах 0,39–0,46, исключение составил вариант NPK-удобрения ($K_x = 0,37$). Засушливые условия вегетации 2015 г. способствовали уменьшению урожайности зерна яровой пшеницы и привели к существенному снижению хозяйственного коэффициента, который на большинстве вариантов снижался ниже значений 2014 года и находился в пределах 0,34–0,39. Это обусловлено снижением массы зерновки и количества зерен в колосе (масса 1000 зерен снизилась в среднем на 7%). По мнению И. Петра (1990), водный дефицит отрицательно сказывается практически на всех процессах, связанных с формированием зерновки, однако наиболее чувствителен к нему процесс ассимиляции, торможение которого сопровождается резким снижением массы зерновки. В 2016 г. при избыточном увлажнении значение K_x варьировало от 0,39 до 0,41.

Среди изучаемых факторов наибольшая величина K_x наблюдалась при применении сидерата, азотного удобрения и Ризоагина и составила в среднем за три года 0,42, что на 0,05 (+14%) выше контрольного варианта. Применение биомассы сидерата в среднем способствует некоторому повышению доли зерна в общебиологическом урожае (+5%), т.е. есть положительная тенденция, что, по-видимому, связано с изменением донорно-акцепторных отношений между колосом и вегетативной массой (Павлов, 1984; Гужов, Фукс, Валичек, 1991; Завалин, 2003). Существенных же различий между вариантами РК и NPK не установлено. В проведенном опыте отмечена положительная тенденция в росте K_x при инокуляции семян яровой пшеницы Ризоагином, особенно на делянках с аммиачной селитрой (+8%), что коррелируется с результатами исследований, полученных на дерново-подзолистых почвах другими исследователями (Бердников, 2002; Завалин, Кандаурова, Чернова, 1997). Наибольший эффект наблюдался при погодных условиях периода вегетации близких к среднемноголетним значениям (2014 год). При применении азотного удобрения и инокуляции Ризоагином K_x составил 0,46, что на 0,09 (+24%) выше варианта без

использования биопрепарата. В 2015 и 2016 гг. положительное действие диазотрофов на фоне внесения аммиачной селитры не прослеживалось.

Таблица 5.3

Влияние азотного удобрения, сидерата и Ризоагрина на коэффициент хозяйственной эффективности урожая (Кх) (2014–2016 гг.)

Вариант	Коэффициент хозяйственной эффективности урожая (Кх)			
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	Средний
1. Фон – P ₆₀ K ₆₀ (Ф) - контроль	0,39	0,34	0,39	0,37
2. Ф + Биомасса сидерата (БМ)	0,41	0,35	0,41	0,39
3. Ф + N ₄₅	0,37	0,37	0,39	0,38
4. Ф + БМ + N ₄₅	0,42	0,39	0,39	0,40
5. Ф + Ризоагрин (РА)	0,40	0,34	0,40	0,38
6. Ф + БМ + РА	0,42	0,36	0,43	0,40
7. Ф + N ₄₅ + РА	0,46	0,37	0,39	0,41
8. Ф + БМ + N ₄₅ + РА	0,46	0,40	0,39	0,42
Р, %	3,18	3,03	2,14	3,77
НСР ₀₅ для частных различий	0,03	0,02	0,03	0,04
НСР ₀₅ для главных факторов	0,02	-	0,02	0,03
НСР ₀₅ для взаимодействий	0,02	-	0,02	0,02

Биопрепарат, азотное удобрение и сидерат способствовали увеличению длины стебля, числа зерен в колосе и массы 1000 зерен и влияли на такой элемент, как продуктивная кустистость (табл. 5.4). Продуктивная кустистость формировалась выше в благоприятные по увлажнению годы по сравнению с засушливыми, при этом некоторая положительная тенденция отмечалась при применении сидерата и аммиачной селитры как отдельно, так и в сочетании.

Длина колоса в среднем за 3 года определялась метеорологическими условиями периода вегетации и уровнем минерального питания. Внесение азотного удобрения, сидерата способствовало увеличению величины колоса. Инокуляция Ризоагрином существенно не влияла на этот показатель.

Длина стебля обусловлена в первую очередь погодными условиями периода вегетации, в частности она сформировалась существенно больше в 2014 году при достаточном снабжении растений влагой за счет атмосферных осадков и благоприятных температурных условиях. Во все годы проведения опыта внесение азотного удобрения и сидерата, отдельно и в сочетании за счет улучшения минерального питания способствовали формированию более длинной соломины (+16...39%). Инокуляция семян биопрепаратом Ризоагрин в результате многофункционального действия микроорганизмов увеличила высоту стеблей яровой пшеницы: на фоне РК-удобрений это увеличение достигало 2,4–3,8 см, на фоне внесения аммиачной селитры – 0,2–1,3 см, на фоне применения сидерата – 0,5–5,1 см. В то же время от внесения сидерата длина соломины возрастала на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве на фоне РК в среднем на 11,3 см (+20%), от применения азотного удобрения – на 12,1 см (+21%), а при совместном применении аммиачной селитры и сидерата на 18,1 см (+32%).

Таблица 5.4

Влияние азотного удобрения, сидерата и Ризоагина на структуру урожая яровой пшеницы (средние за 2014–2016 гг.)

Вариант	Продуктивная кустиность, шт.	Длина стебля, см	Длина колоса, см	Количество зерен в колосе, шт.	Масса 1000 зерен, г
1. Фон – P ₆₀ K ₆₀ (Ф) - контроль	1,0	57,2	5,3	13,8	35,2
2. Ф + Биомасса сидерата (БМ)	1,1	68,5	6,1	19,6	36,6
3. Ф + N ₄₅	1,1	69,4	5,9	18,1	35,9
4. Ф + БМ + N ₄₅	1,1	75,3	6,4	23,9	36,4
5. Ф + Ризоагин (РА)	1,0	60,5	5,4	15,1	35,5
6. Ф + БМ + РА	1,1	70,9	6,3	21,0	36,8
7. Ф + N ₄₅ + РА	1,1	70,2	6,2	21,3	35,9
8. Ф + БМ + N ₄₅ + РА	1,1	76,3	6,5	24,9	37,2
НСР ₀₅ для частных различий	0,1	4,4	0,6	4,6	0,6
НСР ₀₅ для главных факторов	–	2,3	0,4	1,9	0,3

Изменения условий минерального питания отразились на формировании в колосе количества зерен. В частности, применение аммиачной селитры на фоне РК-удобрения повысило количество зерен в одном колосе в среднем за 3 года на 4,3 шт., а внесение биомассы горчицы – на 5,8 шт., при совместном их применении – на 11,4 шт. При инокуляции семян яровой пшеницы препаратом ризосферных diaзотрофов на фоне без внесения азотного удобрения наблюдалась тенденция повышения количества зерен в одном колосе (в среднем за 3 года на 1,3 шт.). На фоне с применением минерального азотного удобрения за счет инокуляции также имела место тенденция увеличения озерненности колоса, такое же изменение этого показателя отмечено и при внесении сидерата отдельно и совместно с аммиачной селитрой. Вышесказанное свидетельствует о том, что микроорганизмы, входящие в состав биопрепаратов, обеспечивают улучшение минерального питания культурного растения и тем самым способствуют некоторому увеличению озерненности колоса.

Погодные условия периода вегетации также оказывали влияние на количество зерен в колосе яровой пшеницы. При достаточном снабжении растений влагой за счет атмосферных осадков и благоприятных температурных условиях (2014 г.) озерненность колоса существенно возрастала по сравнению с засушливым годом (2015 г.).

Урожайность зерновых колосовых культур тесным образом связана с размерами массы 1000 зерен, которая, как правило, при улучшении условий жизни растений возрастает (Павлов, 1984; Завалин, Алметов, 2009). Применение под яровую пшеницу в качестве сидерата биомассы горчицы и азотных удобрений отдельно и в сочетании способствовало получению более выполненного зерна. Существенное влияние на данный показатель оказывали погодные условия вегетации. Максимальную массу 1000 зерен растения формировали в условиях достаточной обеспеченности влагой и благоприятного температурного режима (2014 г.), а минимальную – при недостаточном снабжении растений водой (2015 г.). В среднем за 3 года по сравнению с фоном P₆₀K₆₀ масса 1000 зерен от применения азотного удобрения возросла с 35,2 до 35,9 г или на 0,7 г, от применения биомассы

горчицы – на 1,4 г. Инокуляция семян Ризоагрином существенно не влияла на массу 1000 зерен. Положительная тенденция от применения биопрепарата наблюдалась на фоне $P_{60}K_{60}+BM + N_{45}$ – увеличение в среднем за 3 года составило 0,8 г.

Отображением условий возделывания яровой пшеницы является ее зерновая продуктивность (Жученко, 1994; 2008). Среди факторов, оказывающих воздействие на формирование урожая зерна яровой пшеницы и его качество, важнейшее значение принадлежит условиям азотного питания растений и погодным условиям вегетационного периода (Павлов, 1984; Иванова, 1989; Завалин, Соколов, 2018).

В формировании урожайности зерна яровой пшеницы ведущая роль принадлежит азотным удобрениям, при условии достаточного обеспечения почвы подвижными формами фосфора и калия. Биопрепараты на основе диазотрофов, используемые для инокуляции семян пшеницы, способствуют увеличению сбора зерна за счет дополнительного снабжения растений азотом и продуцирования микроорганизмами физиологически активных веществ различных групп (регуляторы роста, антибиотики и сидерофоры, ограничивающие рост микроорганизмов-фитопатогенов) (Кожемяков, Хотянович, 1997; Умаров, 2009).

Проведенный анализ условий азотного питания растений яровой пшеницы на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с использованием программы STAT выявил роль отдельных факторов в формировании зерновой продуктивности. Основное влияние на продуктивность яровой пшеницы во все годы проведения микрополевого опыта оказали изучаемые факторы. На долю случайных факторов (неконтролируемых факторов) приходилось 2,5–11% (табл. 5.5).

В зависимости от метеорологических условий периода вегетации наблюдалось неодинаковое влияние азотного удобрения и биомассы сидерата на формирование урожайности зерна яровой пшеницы. В условиях достаточного обеспечения растений осадками в период вегетации (2014 и 2016 гг.) доля биомассы сидерата составила 53–55%, а азотного удобрения – 23–42%. Преобладание атмосферных процессов антициклонического характера в 2015 г., а также неравномерное распределение атмосферных осадков по периодам вегетации привели к дефициту влаги, что, в свою очередь, сказалось на влиянии изучаемых удобрений на урожайность зерна. Доля азотного удобрения в формировании зерновой продуктивности составила 52%, в то время как сидерата – 39%. Более высокая доля влияния азотного удобрения обусловлена тем, что основные атмосферные осадки выпали в мае, что способствовало лучшему использованию азота из аммиачной селитры, чем из органического удобрения. В среднем за годы исследований на долю биомассы сидерата приходилось 49%, азотного удобрения – 39%.

Таблица 5.5

Доля влияния изучаемых факторов в формировании урожайности зерна яровой пшеницы по годам исследования, %

Источник влияния	2014 г.	2015 г.	2016 г.	Среднее
Варианты	88,75	96,01	97,53	94,10
Повторений	2,94	1,08	0,25	1,42
Случайные (неконтролируемые)	8,31	2,91	2,22	4,48
А (азотное удобрение)	22,63	51,76	41,68	38,69
В (биомасса сидерата)	53,25	38,90	54,72	48,96
С (инокуляция Ризоагрином)	11,25	2,83	0,57	4,88
А×В	0,02	1,03	0,30	0,45
А×С	1,15	0,72	0,05	0,64
В×С	0,18	0,19	0,18	0,18
А×В×С	0,26	0,59	0,03	0,29

Роль инокуляции семян Ризоагрином в формировании урожая зерна существенно уступала органическим и минеральным удобрениям и составила в среднем за 3 года около 5% с колебаниями по годам от 0,6 до 11%. В условиях оптимального обеспечения влагой при температурах близких к климатической норме (2014 г.) доля влияния биопрепарата возрастала до 11%. При существенном отклонении погодных условий от климатической нормы, как в сторону дефицита влаги (2015 г.), так и при ее избытке (2016 г.), доля влияния ассоциативных диазототрофов на урожай зерна снижается и по результатам исследований не превышает 3%.

Взаимодействие биомассы сидерата и азотного удобрения существенно уступало отдельному действию факторов и составило в среднем около 0,5% с колебаниями по годам от 0 до 1%. Доля влияния азотного удобрения × инокуляции и биомассы × инокуляции в опыте незначительна и колебалась соответственно в пределах 0-1,2 и 0,2%. Влияние взаимодействия азотного удобрения × сидерата × Ризоагина по результатам эксперимента незначительно и в среднем не превышало 0,3%.

В целях определения влияния метеорологических условий на формирование урожайности яровой пшеницы проведен анализ их участия (табл. 5.6).

Доля влияния основных изучаемых в опыте факторов (азотное удобрение, биомасса сидерата и биопрепарат) наиболее существенна и составляет 51,4%. По отдельности доли участия биомассы сидерата и азотного удобрения в формировании урожайности зерна составили соответственно 27,4% и 18,8%. Роль инокуляции семян Ризоагрином в формировании урожайности зерна существенно уступала метеорологическим условиям, органическим и минеральным удобрениям, но также достоверна и составляет 4,5%. Доля влияния взаимодействия двойных, тройных сочетаний факторов незначительна и составила менее 0,3%. Существенное влияние на эффективность применяемых агрохимикатов и биопрепарата оказывают погодные условия, доля которых при возделывании пшеницы довольно существенна и составляет 41,2%. Это необходимо учитывать при разработке технологий выращивания.

Таблица 5.6

Доля влияния факторов в формировании урожайности зерна яровой пшеницы, %

Погодные условия (А)	Азотное удобрение (В)	Биомасса сидерата (С)	Инокуляция (Д)	А×В	А×С	А×Д	В×С	АВС, ВСД, АВД, АВСД	Повторный	Случайные
41,2*	18,8*	27,4*	4,5*	0,3	0,2	0,2	0,02	0,0	1,8	5,6

Примечание: * достоверно на 5% уровне значимости.

Влияние удобрений и Ризоагрина на содержание и вынос азота. Применение органических и минеральных удобрений в едином блоке с биопрепаратами, изготовленными на основе ризосферных микроорганизмов, вызывает необходимость изучения их комплексного воздействия на минеральное питание растений как на один из важнейших процессов, определяющих формирование урожая (Пасынков, 2004). Биопрепараты на основе diaзотрофов способны улучшать минеральное питание растений в период вегетации как за счет вовлечения в агроценоз азота атмосферы, так и в результате усиления поглощения корнями из почвы основных элементов питания (Завалин, 2005; Завалин, Кандаурова, Чернова, 1997; Завалин, Алметов, 2009; Виноградова, 1999 (а); Кандаурова, 1996).

Накопление сухой надземной массы яровой пшеницей в онтогенезе в значительной степени определялось уровнем азотного питания (табл. 5.7). Применение растительной массы горчицы достоверно увеличивало массу растений в фазу кущения в среднем в 1,5 раза по сравнению с фоном РК. Внесение под яровую пшеницу аммиачной селитры в эту фазу развития способствовало росту массы растений в 1,4 раза. В фазу цветения надземная масса в варианте с сидератом увеличилась в 1,4 раза по сравнению с контролем, а в варианте с аммиачной селитрой – в 1,3 раза. При совместном применении органических и минеральных удобрений рост надземной массы яровой пшеницы в фазу кущения вырос в 1,9 раза, в фазу цветения – в 1,7 раза.

Динамика накопления сухой надземной массы яровой пшеницы показала, что инокуляция семян препаратом Ризоагрин, содержащим ассоциативные микроорганизмы *Agrobacterium radiobacter*, не оказывала существенного влияния на формирование растений в фазу кущения. Различия между вариантами без биопрепарата и с ним не существенны – в пределах ошибки опыта. Значительные изменения между вариантами опыта по накоплению надземной массы происходило в фазу цветения. В это время в сосудах, где высевали семена, инокулированные Ризоагрином, надземная масса яровой пшеницы сформировалась в среднем на 10–11% больше, чем без использования биопрепарата. Это связано с тем, что ассоциативные diaзотрофы, используя продукты экзосмоса, корневой опад и корневые выделения растений в качестве источника энергии для азотфиксации, увеличивают содержание минерального азота в почве в середине вегетации и тем самым улучшают условия азотного питания культурных растений (Умаров, 1986; Трепачев, 1999; Завалин, Соколов, 2016).

Таблица 5.7

Динамика формирования сухой надземной массы растениями яровой пшеницы (средние за 3 года), г/сосуд

Вариант	Кущение	Цветение	Полная зрелость
			зерно+солома
1. Фон – P ₆₀ K ₆₀ (Ф) - контроль	1,39	7,79	11,68
2. Ф + Биомасса сидерата (БМ)	2,08	10,87	17,56
3. Ф + N ₄₅	2,00	10,36	16,70
4. Ф + БМ + N ₄₅	2,70	13,58	21,81
5. Ф + Ризоагин (РА)	1,48	8,69	13,16
6. Ф + БМ + РА	2,17	11,93	19,20
7. Ф + N ₄₅ + РА	2,09	11,49	18,52
8. Ф + БМ + N ₄₅ + РА	2,74	14,22	22,80
НСР ₀₅ част. различий	0,18	0,36	0,56
НСР ₀₅ для главных факторов	0,08	0,21	0,32

Улучшение азотного питания растений за счет применения биомассы горчицы и азотного удобрения отдельно и в сочетании способствовало повышению эффективности ассоциативных диазотрофов в фазу цветения. Увеличение сухой надземной массы яровой пшеницы в среднем составило 9–11%. Это объясняется тем, что при улучшении азотного питания растения формируют более мощную надземную массу и развитую корневую систему и повышают обеспеченность микроорганизмов источниками энергии, а микроорганизмы, как говорилось выше, усиливают обеспечение яровой пшеницы азотом.

На потребление азота и, как следствие, на формирование вегетативной массы растений существенное влияние оказывали погодные условия. Так, достаточное обеспечение в период вегетации растений влагой в 2014 и 2016 гг. способствовало, по-видимому, более интенсивному разложению биомассы горчицы, вследствие чего в этом варианте рост надземной массы яровой пшеницы по сравнению с фоном РК-удобрений вырос в фазу кущения в 1,4–1,5 раза и фазу цветения – в 1,4 раза. В эти годы минеральные азотные удобрения приводили к увеличению массы растений соответственно в фазу кущения и в фазу цветения в 1,3 раза. Недостаточное обеспечение вегетирующих растений влагой в июне-июле 2015 г. отразилось на эффективности использования азота биомассы горчицы и, как следствие, увеличение массы яровой пшеницы в фазы кущения и цветения составило в 1,3 раза, что меньше чем от применения аммиачной селитры – в 1,4 раза.

В большей степени погодные условия отразились на эффективности Ризоагина. И в первую очередь влажность почвы, которая зависит от количества выпадения осадков. Влажность почвы выступает важнейшим условием активного функционирования азотфиксирующей микрофлоры (Умаров, 1986). При оптимальной влажности создаются необходимые условия для интенсивного фотосинтеза и высокого уровня экспрессии корневых выделений, что способствует поддержанию активного физиологического состояния и высокой численности ризосферных микроорганизмов (Садыков, 1989; Завалин, 2005). Результаты исследований

А.М. Кунаковой (2000), Б.Ф. Садыкова (1989) указывают, что температура почвы, по крайней мере, в зоне умеренного климата, в меньшей степени, чем влажность влияет на колонизацию и приживаемость диазотрофов в ризоплане растений. Наши исследования показали, что при недостатке выпадения осадков в 2015 году инокуляция семян яровой пшеницы Ризоагрином на варианте РК-удобрений не оказала существенного влияния на рост растений. Это наблюдалось по динамике накопления растительной массы пшеницы – ни в фазу кущения, ни в фазу цветения существенных различий не установлено. Иная ситуация сложилась в 2014 и 2016 гг.

Наибольший положительный эффект от инокуляции Ризоагрином отмечен в 2014 г. при метеорологических условиях, близких к оптимальным. Достаточные запасы влаги в почве и обеспеченность осадками в период вегетации способствовали увеличению формирования надземной массы растений пшеницы в фазу цветения. В варианте применения фосфорных и калийных удобрений обработка семян биопрепаратом диазотрофов способствовала росту формирования вегетативной массы на 11–14%. Накопление большей массы к фазе цветения определило и формирование более высокого урожая зерна. На фоне применения растительной массы горчицы эффект от Ризоагрина в 2014 году составил 10–11%, на фоне минерального удобрения – 7–9%. При совместном использовании аммиачной селитры и сидерата горчицы рост вегетирующей массы яровой пшеницы от Ризоагрина оказался незначительным – всего 2–6%.

Подобная ситуация сложилась и в 2016 г. Однако избыток осадков, по-видимому, приводил к росту непродуктивных потерь минерализованного азота, что отразилось на абсолютных значениях накопления растительной надземной массы яровой пшеницы в варианте РК. Вместе с тем необходимо отметить, что температура воздуха, близкая к среднегодовому значению, и достаточные запасы влаги в мае 2016 г., по-видимому, способствовали разложению растительной массы горчицы и увеличили количество доступных соединений углеводов для ассоциативных микроорганизмов, как следствие, в течение вегетации масса растений в варианте РК+БМ+РА оказалась в 1,1–1,2 раза больше, чем без Ризоагрина.

Наблюдения за динамикой накопления общего азота в растениях показали, что с усилением уровня азотного питания увеличивалось накопление биомассы и содержание азота. Изменение накопления биомассы растений яровой пшеницы при применении удобрений связаны с улучшением минерального питания растений и в первую очередь растительной массы горчицы и аммиачной селитры. Об этом свидетельствуют данные о содержании (табл. 5.8) и накоплении (табл. 5.9) общего азота в растениях в период вегетации. В период от всходов до фазы цветения максимальное содержание общего азота в растениях было в фазу кущения (2,53–3,58%), что наблюдалось во все годы опыта. Содержание азота в целых растениях в фазу кущения значительно увеличивалось от применения биомассы горчицы и азотного удобрения как отдельно, так и при совместном их использовании по сравнению с РК-фоном – более чем на 0,56–0,63%. Это объясняется тем, что при совместном внесении биомассы горчицы и азотных минеральных удобрений усиливается минерализация азота горчицы и азота почвы

(Серегин, 2000; Авилов, Соколов и др., 2016). Концентрация общего азота, в отличие от биомассы, с возрастом растений яровой пшеницы снижалась: в фазу цветения по сравнению с фазой кущения на 43,3–53,7%. В фазу цветения различия концентрации азота между вариантами четко выражены при использовании как органических, так и минеральных удобрений. При этом за счет улучшения питания содержание азота в растениях яровой пшеницы достоверно повышалось от применения аммиачной селитры и биомассы горчицы (отдельно и в сочетании) в среднем с 1,17 до 1,38–1,49% (на 0,21–0,32%).

Инокуляция семян яровой пшеницы Ризоагином хотя и проявилась положительно в фазу кущения, однако эти увеличения составили 0,19% (делянки с биомассой горчицы) и 0,22% (с аммиачной селитрой). К фазе цветения преимущество вариантов, где высевались семена, обработанные diaзотрофами, по сравнению с не обработанными, снизилось и отмечено только на делянках с сидератами (+0,12%).

Потребление (накопление) азота растениями определяется биологическими особенностями возделываемой культуры (поглощение NO_3^- и NH_4^+ , их ассимиляция, транспорт, распределение между органами, реутилизация, накопление в репродуктивных органах) и почвенными условиями (минерализационно-иммобилизационные соотношения процессов, рН, активность почвенных ферментов и активность микроорганизмов азотного цикла) (Соколов, Семенов, 1994; Завалин, Соколов, 2016). В фазу кущения в результате применения азотного удобрения и биомассы горчицы потребление азота растениями яровой пшеницы достигало 63–65 мг на сосуд, больше чем на контроле в 1,7–1,8 раза (табл. 5.9). В фазу цветения накопление азота возрастало в целых растениях с 63 до 144 мг/сосуд при дозе N_{45} и с 65 до 155 мг/сосуд при внесении биомассы горчицы. Суммарное потребление азота в эту фазу увеличилось по аммиачной селитре в 2,3 раза и по биомассе горчицы в 2,4 раза. В сравнении с контролем в фазу цветения яровой пшеницы благодаря лучшей обеспеченности азотом накопление в варианте Ф + БМ увеличилось в 1,7 раза, Ф + N_{45} – в 1,5 раза.

Таблица 5.8

Содержание азота в растениях яровой пшеницы по фазам развития (средние за 3 года), %

Вариант	Кущение	Цветение	Полная зрелость	
			зерно	солома
1. Фон – $\text{P}_{60}\text{K}_{60}$ (Ф) - контроль	2,53	1,17	1,94	0,41
2. Ф + Биомасса сидерата (БМ)	3,09	1,39	2,11	0,46
3. Ф + N_{45}	3,13	1,38	2,07	0,45
4. Ф + БМ + N_{45}	3,32	1,49	2,20	0,47
5. Ф + Ризоагин (РА)	2,70	1,21	2,01	0,42
6. Ф + БМ + РА	3,28	1,51	2,18	0,49
7. Ф + N_{45} + РА	3,35	1,41	2,05	0,44
8. Ф + БМ + N_{45} + РА	3,58	1,60	2,26	0,48
НСР ₀₅ част. различий	0,12	0,09	0,07	0,05
НСР ₀₅ для главных факторов	0,07	0,06	0,05	0,03

Применение Ризоагрина в посевах пшеницы способствовало увеличению накопления азота растениями: в фазу кущения – от 11 до 13% в вариантах внесения биомассы горчицы и аммиачной селитры, в фазу цветения – соответственно на 19% и 15%. При совместном применении органического и минерального удобрения рост накопления азота снижался на 9% в фазу кущения и на 13% в фазу цветения.

Результаты исследований показывают, что накопление азота, содержание общего азота и, как следствие, величина биомассы растений зависела как от условий азотного питания, так и от условий увлажнения в период вегетации.

Данные, представленные в таблице 5.10, показывают, что величина сухой биомассы растений яровой пшеницы в фазы кущения определялась условиями азотного питания (во все годы эксперимента в мае обеспечение влагой – достаточное, а температура воздуха либо соответствовала среднегодовому значению, либо на 1,7–2,1°C выше).

Таблица 5.9

Накопление азота растениями яровой пшеницы по фазам развития (средние за 3 года), мг/сосуд

Вариант	Кущение	Цветение	Полная спелость
			зерно+солома
1. Фон – P ₆₀ K ₆₀ (Ф) - контроль	36	93	101
2. Ф + Биомасса сидерата (БМ)	65	155	169
3. Ф + N ₄₅	63	144	154
4. Ф + БМ + N ₄₅	91	204	220
5. Ф + Ризоагрин (РА)	41	110	119
6. Ф + БМ + РА	72	184	199
7. Ф + N ₄₅ + РА	71	165	177
8. Ф + БМ + N ₄₅ + РА	99	231	244
НСР ₀₅ част. различий	6	11	15
НСР ₀₅ для главных факторов	4	6	9

Таблица 5.10

Доля влияния факторов в формировании биомассы яровой пшеницы по фазам развития, %

Погод- ные условия (А)	Азотное удобрение (В)	Биомасса сидерата (С)	Инокуля- ция (Д)	A×B	A×C	A×D	B×C	ABC, BCD, ABD, ABCD	Пов- тор- ный	Слу- чай- ные
Кущение (P – 3,05%)										
17,9	34,1	43,7	0,6	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	1,0	2,6
Цветение (P – 4,49%)										
52,4	22,8	16,3	2,1	0,02	0,01	0,01	0,01	0,07	2,1	4,2

В фазу цветения накопление растительной массы в большей степени определялось уровнем увлажнения в вегетационный период, на втором месте – уровнем азотного питания. Однако азот является первичным «строительным материалом», необходимым для синтеза белков и формирования биомассы. Снижение темпов формирования биомассы (урожая зерна) при неблагоприятных гидротермических условиях связано

в первую очередь с подавлением процессов поступления (поглощения) азота в клетку, транспорта и ассимиляции (Завалин, Соколов, 2016).

Содержание азота в зерне, как и белка, подвержено большой изменчивости и зависит от условий выращивания (модификационная изменчивость) и наследственных (генотипических) особенностей (Завалин, 2003). В зависимости от условий выращивания содержание азота и белка в зерне может существенно изменяться. По данным А.Н. Павлова (1984), колебания содержания белка в зерне могут достигать 1,5-2 раза. Накопление азота зерновыми культурами и, следовательно, белковость зерна в большей степени зависит от обеспеченности растений этим элементом в период вегетации, а также от снабжения влагой (Павлов, 1967, 1984; Кореньков, 1999; Завалин, Соколов, 2018). Действие других факторов, оказывающих влияние на содержание азота и белка в зерне, сводится к изменению условий азотного питания растений (применение удобрений, предшественники, известкование, орошение, почва, ее эродированность) (Павлов, 1984; Петр, 1990; Завалин, 2003; Шмырева, Соколов, Завалин и др., 2017; Шмырева, Соколов, Завалин, 2017; Соколов, Завалин, Шмырева и др., 2015; Соколов, Черников, Шмырева, 2016; Завалин, Соколов, 2018).

Существенное влияние на содержание азота и белковость зерна оказывают гидротермические условия периода вегетации. Значительное снижение содержания азота (и белка) в зерне происходит при выпадении осадков в начальные фазы развития (всходы – кушение) и в период налива зерна. Нормальное увлажнение в период кушения способствует закладке большего количества зерен в колосе, что приводит к росту объема разбавлению азота в растении в результате повышения урожайности при том же запасе азота в почве, как и при меньшей влажности (Пасынкова, 2013). Выпадение значительного количества осадков в период налива способствует снижению накопления белка в силу того, что удлиняет налив зерна (выпадение дождей обычно сопровождается понижением температуры), нарушается соотношение белков и углеводов в зерновках (происходит изменение соотношения поступающих в зерно азотистых веществ и углеводов в пользу последних (Павлов, 1967, 1984; Петр, 1990). В проведенном микрополевом опыте в 2014 и 2015 гг. в варианте применения фосфорных и калийных удобрений отмечено наибольшее накопление азота в зерне (соответственно 2,05 и 1,99%), что обусловлено метеорологическими условиями в период налива зерна (в июле месяце температура воздуха выше среднемноголетнего значения на 0,5–2,0°C при недостатке выпадения осадков – ниже среднемноголетнего значения на 15–66 мм) (табл. 5.11). В 2016 г. количество выпавших осадков в фазу налива зерна (июль месяц) составило 150 мм (156% к среднемноголетнему значению), что способствовало увеличению продолжительности фаз налива и созревания зерна на 7 дней, а также снижению содержания азота в зерне до 1,77 %.

Улучшение условий азотного питания яровой пшеницы за счет внесения удобрений обеспечивало рост потребления азота растениями: азотные удобрения в дозе 30 кг/га на фоне $P_{60}K_{60}$ в среднем за 3 года способствовали увеличению содержания азота в зерне на 0,15%, применение биомассы горчицы – на 0,19%. При этом необходимо отметить, что существенных

различий между вариантами внесения органических удобрений (биомассы горчицы) и аммиачной селитры по содержанию азота в зерне не установлено.

Инокуляция семян биопрепаратами в среднем за годы исследований на фоне применения фосфорных и калийных удобрений способствовала повышению накопления в зерне азота на 0,5%. Особенно существенно эффект от инокуляции яровой пшеницы Ризоагрином проявлялся при выпадении осадков близком к среднемноголетнему показателю (2014 г.). Исключение составил вариант НРК. В условиях недостатка выпадения осадков (2015 г.) отмечалась только тенденция к увеличению содержания азота в зерне при применении Ризоагрина. В благоприятный по метеорологическим условиям 2014 г. и при избыточном увлажнении (2016 г.) применение биопрепарата на варианте с НРК положительного эффекта не отмечено по сравнению с контролем, что может быть объяснено ростовым разбавлением, которое наблюдается при нормальном увлажнении в период кушения (способствует закладке большого количества зерен в колосе и приводит к ростовому разбавлению азота в растении в результате повышения урожайности при том же запасе азота в почве, как и при малой влажности) (Пасынков, 2004; Коновалов, 1981; Эзрохин, 1994).

Таблица 5.11

Содержание азота и белка в зерне яровой пшеницы, % на абсолютно сухое вещество (2014–2016 гг.)

Вариант	Содержание азота, %				Содержание белка, %			
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	среднее	2014 г.	2015 г.	2016 г.	среднее
1. Фон – P ₆₀ K ₆₀ (Ф) - контроль	2,05	1,99	1,77	1,94	11,7	11,3	10,1	11,1
2. Ф + Биомасса сидерата (БМ)	2,21	2,14	1,97	2,11	12,6	12,2	11,2	12,0
3. Ф + N ₄₅	2,22	2,08	1,91	2,07	12,7	11,9	10,9	11,8
4. Ф + БМ + N ₄₅	2,32	2,29	1,99	2,20	13,2	13,1	11,3	12,5
5. Ф + Ризоагрин (РА)	2,24	1,99	1,79	2,01	12,8	11,3	10,2	11,4
6. Ф + БМ + РА	2,28	2,18	2,13	2,18	13,0	12,4	12,1	12,4
7. Ф + N ₄₅ + РА	2,16	2,08	1,92	2,05	12,3	11,9	10,9	11,7
8. Ф + БМ + N ₄₅ + РА	2,34	2,30	2,16	2,26	13,3	13,1	12,2	12,9
НСР ₀₅ част. различий	0,05	0,08	0,06	0,07	0,5	0,8	0,6	0,7
НСР ₀₅ для главных факторов	0,04	0,05	0,03	0,05	0,4	0,5	0,3	0,5

Оценка действия биопрепарата Ризоагрин на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве на яровую пшеницу показала, что содержание азота в соломе в большей степени зависело от погодных условий периода вегетации и в меньшей – условий питания (табл. 5.12). Наибольшая концентрация азота в соломе яровой пшеницы наблюдалась при благоприятных погодных условиях в 2014 году (составила 0,48–0,56%). В 2015 г. при недостатке атмосферных осадков содержание азота в соломе находилось в пределах 0,33–0,44%. Снижение данного показателя отмечено по всем вариантам опыта. В условиях избыточного выпадения осадков (при ливневом характере выпадения дождей) содержание азота в соломе составило 0,38–0,49.

В соломе яровой пшеницы в результате отдельного применения удобрений (органических и минеральных) и инокуляции биопрепаратом Ризоагрин концентрация азота существенно не менялась. Применение органического удобрения в виде тонкоизмельченной растительной массы горчицы белой совместно с Ризоагрином дало положительный эффект на содержание азота в соломе яровой пшеницы (в среднем за три года +0,08%). Это может быть объяснено не только значительным внесением азота в органической форме, но и тем, что микроорганизмы, входящие в состав биопрепаратов, фиксируют атмосферный азот и продуцируют биологически активные вещества, стимулирующие развитие корневой системы и соломины яровой пшеницы (Никитин, 2017).

Улучшение условий азотного питания за счет совместного применения биомассы горчицы и аммиачной селитры и инокуляции Ризоагрином привело к росту содержания азота в соломе яровой пшеницы в среднем за три года с 0,41% до 0,48%.

Содержание азота в соломе яровой пшеницы при применении аммиачной селитры на фоне Р60К60 увеличивалось. В опыте наблюдали снижение содержания азота в соломе при инокуляции яровой пшеницы изучаемым биопрепаратом в 2014 г. в условиях оптимального увлажнения, что связано с ростовым разбавлением (Завалин, 2005).

Таблица 5.12

Содержание азота в соломе яровой пшеницы, % на абсолютно сухое вещество (среднее за 3 года)

Вариант	Содержание азота, %			
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	среднее
1. Фон – Р ₆₀ К ₆₀ (Ф) - контроль	0,51	0,33	0,38	0,41
2. Ф + Биомасса сидерата (БМ)	0,52	0,40	0,44	0,46
3. Ф + N ₄₅	0,54	0,37	0,45	0,45
4. Ф + БМ + N ₄₅	0,50	0,44	0,46	0,47
5. Ф + Ризоагрин (РА)	0,49	0,36	0,40	0,42
6. Ф + БМ + РА	0,56	0,42	0,49	0,49
7. Ф + N ₄₅ + РА	0,48	0,38	0,45	0,44
8. Ф + БМ + N ₄₅ + РА	0,51	0,44	0,49	0,48
НСР ₀₅ частных различий	0,03	0,08	0,04	0,05
НСР ₀₅ для главных факторов	0,02	0,05	0,03	0,03

Вынос азота с урожаем зерна и соломы яровой пшеницы на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в результате улучшения условий минерального питания за счет минерального и органического удобрений и инокуляции семян биопрепаратом Ризоагрин возрастал во все годы исследований (табл. 5.13). При этом в засушливые и излишне увлажненные годы вынос азота снижался.

Вынос азота зависит от биологических особенностей культуры и почвенных условий (табл. 5.13). Применение N-удобрения способствовало увеличению выноса азота с урожаем в среднем на 52%.

Таблица 5.13

Вынос азота яровой пшеницы с урожаем зерна и соломы (средний за 3 года)

Вариант	Вынос с урожаем, мг/сосуд			Азотный индекс
	зерно	солома	всего	
1. Фон – P ₆₀ K ₆₀ (Ф) - контроль	75	26	101	0,74
2. Ф + Биомасса сидерата (БМ)	127	42	169	0,75
3. Ф + N ₄₅	112	42	154	0,73
4. Ф + БМ + N ₄₅	167	53	220	0,76
5. Ф + Ризоагрин (РА)	89	30	119	0,75
6. Ф + БМ + РА	149	50	199	0,75
7. Ф + N ₄₅ + РА	137	40	177	0,76
8. Ф + БМ + N ₄₅ + РА	189	55	244	0,77
НСР ₀₅ частных различий	13	5	15	–
НСР ₀₅ для главных факторов	8	3	10	–

Внесение растительной массы горчицы за счет улучшения условий питания способствовало росту выноса азота во все годы исследований в среднем на 67%. Совместное применение аммиачной селитры и биомассы горчицы позволило увеличить вынос азота на 118%.

Использование растительной массы и минерального азотного удобрения отдельно и в сочетании отразилось на распределении азота в отдельных органах яровой пшеницы. Подавляющая часть потребленного азота накапливалась в зерне, меньше в соломе. В зерне яровой пшеницы при улучшении обеспеченности растений азотом в период вегетации содержалось 73–77% накопленного в урожае этого элемента. Это свидетельствует об эффективном использовании растениями азота на формирование хозяйственно ценной части урожая данной сельскохозяйственной культуры. При недостатке азота (вариант внесения РК-удобрений) растения яровой пшеницы вынуждены реутилизировать потребляемый азот из вегетативных органов в генеративные, а именно в зерно, особенно в условиях недостаточного или избыточного увлажнения, о чем свидетельствует в этом случае доля азота зерна (75–76%) от общего его накопления в надземной биомассе.

Инокуляция семян препаратом ризосферных diaзотрофов повышала вынос азота как на фоне РК, так и на фоне NPK биомассы горчицы и совместного их применения. Увеличение выноса азота с урожаем яровой пшеницы от Ризоагрина достигало 18% на фоне РК, 15% – на фоне полного минерального удобрения, 18% – по фону внесения биомассы горчицы и 11% – при совместном применении NPK и биомассы горчицы. Положительное действие биопрепарата ассоциативных diaзотрофов объясняется улучшением условий азотного питания во второй половине вегетации, когда запасы минерального азота в почве уменьшаются (Завалин, 2005).

Агрономическая эффективность. Критерием целесообразности применения удобрений является их эффективность. Увеличение эффективности применения удобрений в современных агротехнологиях выращивания сельскохозяйственных культур является важным аспектом совершенствования адаптивно-ландшафтных систем земледелия и рационального использования материально-технических средств

(Кудеяров, 1989; Иванов, Завалин, 2010; Сычев, Завалин, Шафран и др., 2009; Никитин, 2015). Мерой эффективности любого удобрения, и в частности азотного, служит оплата единицы внесенного элемента прибавкой урожая основной продукции. Агрономическую эффективность азотного удобрения рассчитывали по величине прибавки, полученной от внесения определенной дозы удобрения, по формуле:

$$AЭ = (У_{НРК} - У_{РК}) / Д_N,$$

где $AЭ$ – агрономическая эффективность; $У_{НРК}$, $У_{РК}$ – урожай пшеницы при применении и без применения азотных удобрений, кг/га; $Д_N$ – доза внесения азотного удобрения, кг/га действующего вещества (Семенов, 1999).

Эффективность органического удобрения (биомассы горчицы белой) рассчитывали по формуле:

$$Oк = Уп / Д,$$

где $Уп$ – прибавка от удобрения, т/га; $Д$ – доза внесения органического удобрения, т/га. Для пересчета в килограммы полученный результат умножается на 1000, тогда эффективность составляет кг зерн. ед./т. При расчете эффективности 1 кг действующего вещества азота органического удобрения прибавка от удобрения делится на суммарное содержание в нем N (Справочная книга..., 2001).

На агрономическую эффективность азотного удобрения прибавкой урожая зерна влияют многие факторы, среди которых существенное значение принадлежит уровню плодородия почвы, дозам внесения удобрения, интенсивности технологий возделывания культур, интегрированной системе защиты растений, биопрепаратов, регуляторов роста растений (Шафран, Прошкин и др. 2010; Завалин, 2005).

Расчеты агрономической эффективности азота биомассы горчицы и азотного удобрения показали, что она изменялась по создаваемым фонам (табл. 5.14). В варианте применения азотного удобрения эффективность 1 г азота прибавкой урожая в среднем составила 23,0 г зерна с колебаниями по годам от 19,6 в 2016 г. до 21,4 в 2014 г. 28,0 в 2015 г. Такое варьирование значений обусловлено влиянием метеорологических условий выращивания. Более высокая агрономическая эффективность азота удобрения в 2014 и 2015 гг. может объясняться тем, что за ноябрь-март сумма выпавших осадков находилась близкой к среднегодовому значению, и количество потерь минерального азота от вымывания с инфильтрационными водами – минимальным. Ван-дер-Пау (1962) указывал на зависимость между количеством зимних осадков и требованиями растений к обеспечению азотом. Он пришел к выводу, что после влажной зимы необходимо повысить дозы азотных удобрений для компенсации вымываемого азота.

Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы

Таблица 5.14

Агрономическая эффективность азота удобрений прибавкой урожая,
г зерна/г внесенного N

Вариант	2014 г.	2015 г.	2016 г.	Средняя
Ф + Биомасса горчицы (БМ)	16,5	6,6	11,0	11,4
Ф + N ₄₅	21,4	28,0	19,6	23,0
Ф + БМ + N ₄₅	19,0	10,9	12,8	14,2
Ф + БМ + РА	21,8	10,6	12,8	15,1
Ф + N ₄₅ + РА	55,9	36,9	28,9	40,6
Ф + БМ + N ₄₅ + РА	24,8	13,4	13,7	17,3

Примечание: Ф – фон P₆₀K₆₀ – контроль; РА – Ризоагрин;
с биомассой горчицы внесено в 2014 г. 12,9 г N/м², в 2015 г. – 12,1 г N/м²,
в 2016 г. – 12,3 г N/м²; с аммиачной селитрой ежегодно внесено 4,56 г N/м².

Агрономическая эффективность каждого грамма азота биомассы сидерата меньше азота аммиачной селитры и составляла 6,6–16,5 г зерна, что обусловлено доступностью для растений элементов питания из растительной массы горчицы, которая ниже, чем у минерального удобрения (Завалин, Соколов, 2016).

Инокуляция Ризоагрином семян яровой пшеницы во всех вариантах способствовала повышению окупаемости 1 г внесенного азота, что обусловлено ростом урожайности культуры. Это отмечено во все годы проведения исследований. Наибольшая – в 2014 г. при благоприятных метеорологических условиях (рост эффективности азота в 1,3–2,6 раза). Так, при инокуляции яровой пшеницы биопрепаратом в варианте внесения аммиачной селитры агрономическая эффективность составляла 28,9–55,9 г зерна, что в среднем на 17% выше РК-фона. Эффективность N в варианте внесения аммиачной селитры при использовании Ризоагрина увеличивалась с 19,6–28,0 до 28,9–55,9 г зерна. Прирост данного показателя в среднем составил 76%. Положительное действие инокуляции на агрономическую эффективность внесенного азота также отмечено в варианте внесения биомассы горчицы белой, рост в среднем составил 32%. При совместном применении биомассы горчицы и азотного удобрения эффективность составила в среднем 14,2 г зерна. Применение Ризоагрина в этом варианте способствовало росту агрономической эффективности азота удобрений на 21%.

Таким образом, инокуляция семян яровой пшеницы препаратом Ризоагрин, содержащим ассоциативные микроорганизмы *Agrobacterium radiobacter*, способствовала росту агрономической эффективности внесенного азота в зависимости от варианта от 21 до 76%.

Следовательно, применение азотного удобрения на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве способствовало росту зерновой продуктивности в зависимости от погодных условий на 30–69%, внесение растительной массы горчицы белой – на 44–65%, совместное их использование – на 96–101%.

Инокуляция семян яровой пшеницы Ризоагрином достоверно увеличивала урожайность зерна на варианте РК-удобрений в среднем на 16%, в вариантах внесения растительной массы горчицы – на 12%, применения

минерального удобрения – на 23%. При совместном их применении инокуляция Ризоагином привела к росту зерновой продуктивности на 11%.

На массу соломы яровой пшеницы положительно влияет улучшение азотного питания за счет применения сидерата и минерального удобрения, рост урожайности составил 46–79%. Достоверных различий по эффективности применяемых агрохимикатов на сбор побочной продукции в опыте не установлено. Инокуляция семян яровой пшеницы положительно отражается на массе соломы на фоне РК-удобрений и биомассы горчицы. На фоне минерального азотного удобрения, вносимого под яровую пшеницу, инокуляция Ризоагином способствовала только незначительному росту (тенденция) сбора соломы – в среднем не более 4%.

Доля основной продукции (зерно) в общем урожае (зерно + солома) в опыте с яровой пшеницей составляла 0,34–0,46. На коэффициент хозяйственной эффективности в большей степени влияли погодные условия – недостаток влаги в период вегетации его уменьшал в зависимости от варианта применения агрохимикатов на 7–20%. Применение средств химизации и биологизации существенно не влияет на этот показатель – имеется лишь тенденция к повышению доли зерна в общебиологическом урожае при посеве инокулированных семян при внесении азотного удобрения отдельно и в сочетании с запахиванием растительной массы горчицы (сидерата).

Азотное удобрение и сидерат способствуют увеличению длины стебля на 20–32%, числа зерен в колосе – на 31–73% и массы 1000 зерен – на 0,7–1,4 г. Инокуляция Ризоагином обеспечила только положительную тенденцию к росту числа зерен в колосе, увеличению длины соломины и массы 1000 зерен.

По степени влияния на урожайность зерна яровой пшеницы первое место занимают метеорологические условия (41,2%). Доля влияния основных изучаемых в опыте факторов (азотное удобрение, биомасса сидерата и биопрепарат) также существенна и составляет 51,4%. По отдельности доли участия биомассы сидерата и азотного удобрения в формировании урожайности зерна составили соответственно 27,4% и 18,8%. Роль инокуляции семян Ризоагином в формировании урожайности зерна существенно уступала воздействию метеорологических условий, органическим и минеральным удобрениям, но также достоверна и составляет 4,5%. Доля влияния взаимодействия двойных, тройных сочетаний факторов незначительна и составила менее 0,3%.

Улучшение условий азотного питания яровой пшеницы за счет внесения азотного удобрения способствовало увеличению содержания азота в зерне на 0,15%, внесение биомассы горчицы – на 0,19%. Существенных различий между органическим удобрением (биомасса горчицы) и аммиачной селитрой по содержанию азота в зерне не установлено. Инокуляция семян Ризоагином в среднем за годы исследований на фоне применения РК-удобрений способствовала повышению накопления в зерне азота на 0,5%.

Содержание азота в соломе в большей степени зависело от метеорологических условий вегетации яровой пшеницы и в меньшей – условий питания. Наибольшая концентрация азота в соломе яровой

пшеницы наблюдалась при благоприятных погодных условиях в 2014 г. (0,48–0,56%). При недостатке атмосферных осадков (2015 г.) содержание азота в соломе снижалось с 0,48–0,56% до 0,36–0,44%. В условиях избыточного выпадения осадков содержание азота в соломе составило 0,40–0,49%. В результате отдельного применения удобрений (органических и минеральных) и инокуляции Ризоагрином концентрация азота в соломе существенно не менялась. Вместе с тем совместное применение биомассы горчицы, аммиачной селитры и инокуляции семян Ризоагрином привело к росту содержания азота в соломе яровой пшеницы в среднем за три года с 0,43% до 0,48%.

Применение азотного удобрения способствовало увеличению выноса азота в среднем на 52%, внесение растительной массы горчицы – на 67%, их совместное использование – на 118%.

Инокуляция семян препаратом ризосферных diaзотрофов повышала вынос азота урожаем на 18% на фоне РК, на 15% – на фоне полного минерального удобрения, на 18% – по фону внесения биомассы горчицы и на 11% – при совместном применении NPK и биомассы горчицы.

Агрономическая эффективность азота удобрения прибавкой урожая зерна от применения биомассы горчицы составила в среднем 11 г, аммиачной селитры – 23,0 г, их совместного использования – 14,2 г. Инокуляция семян Ризоагрином повышала эффективность применяемых агрохимикатов в зависимости от варианта опыта в 1,2 – 1,8 раза.

Глава 6. Эффективность применения биопрепаратов эндофитных микроорганизмов и азотного удобрения на яровой пшенице

Участвуя в круговороте различных веществ, микроорганизмы обеспечивают не только устойчивое функционирование агроценоза, как одной из составных частей экосистемы, но и являются чувствительными индикаторами, отражающими изменение условий среды обитания. От характера воздействия на сукцессии почвенных микроорганизмов (водно-воздушный, тепловой, пищевой режимы и др.) изменяются сложившаяся равновесная система, структура и функции микробиоценоза, его биологическая активность (Тихонович, Завалин, 2016). Биологические препараты, созданные на основе штаммов эндофитных микроорганизмов, встраиваются в существующую систему и изменяют агроценоз, в том числе и почвенное плодородие. Микроорганизмы действуют не отдельно от растений, а взаимодействуют – вступают в ассоциации.

Вместе с тем остаются не решенными вопросы взаимодействия удобрений и биопрепаратов на основе эндофитных микроорганизмов при формировании урожая сельскохозяйственных культур и установления количественных параметров использования азота при возделывании культурных растений, которые необходимы для предложения производству агроэкономически и экологически обоснованных параметров внесения удобрений.

Для решения поставленных проблем в микрополевоом опыте определяли эффективность применения биологических препаратов на основе эндофитных микроорганизмов при возделывании яровой пшеницы на разных уровнях азотного питания. Опыт проводили на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве на Центральной опытной станции ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова в Московской области. Пахотный слой почвы (0–22 см) имел близкую к нейтральной реакцию среды (pH_{KCl} 6,3–6,4), содержание гумуса (по Тюрину) 2,1–2,4%, подвижных форм фосфора и калия (по Кирсанову) выше среднего (соответственно 164–178 и 170–190 мг/кг).

Продуктивность яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Злата за два года исследований на фоне применения фосфорных и калийных удобрений составила 15 г зерна /сосуд (табл. 6.1). Внесение азотного удобрения в дозе N_{45} на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве при оптимальных значениях агрохимических показателей способствовало росту урожайности зерна на 70–73 %.

Таблица 6.1
Влияние азотного удобрения и биопрепаратов эндофитных бактерий на урожайность зерна яровой пшеницы

Вариант	Урожайность зерна, г/сосуд			Прибавка зерна к контролю,	
	2015 г.	2016 г.	средняя	г/сосуд	%
1. $P_{30}K_{45}$ –фон (Ф1)	14,5	15,4	15,0	-	-
2. Ф + Экстрасол	18,6	19,1	18,9	3,9	26
3. Ф + БП1	16,9	22,9	19,9	5,0	33
4. Ф + БП2	18,0	19,5	18,8	3,8	25
5. $N_{45}P_{30}K_{45}$ (Ф2)	25,1	26,2	25,7	10,7	71
6. Ф2 + Экстрасол	23,2	27,1	25,2	10,2	68
7. Ф2 + БП1	30,8	24,9	27,8	12,8	85
8. Ф2 + БП2	29,2	27,5	28,3	13,3	89
P, %	4,00	4,63	3,21	3,21	3,2
НСР ₀₅ А-удобрение	0,6	0,8	0,5	0,5	3
НСР ₀₅ В-биопрепарат	0,9	1,1	0,7	0,7	5
НСР ₀₅ част. различий	2,6	3,1	2,1	2,1	14

Примечание: опыт проводили в сосудах без дна площадью 0,04 м²; предшественник – картофель.

Использование микробиологических препаратов положительно сказалось на урожайности зерна. Действие биопрепарата БП1 (штамм *Bacillus megasterium* V-3, эндофит выделенный из внутренних тканей черенков винограда сорта Мускат черный) варьировало по годам исследований и фонам минерального питания. Положительное влияние отмечено на фоне фосфорного и калийного удобрений, которое выразилось в росте урожайности зерна в среднем на 33%. Применение биопрепарата БП1 при внесении N_{45} -удобрения способствовало росту урожайности зерна в среднем на 8%. При инокуляции семян яровой пшеницы биопрепаратом эндофитных бактерий БП2 (штамм *Bacillus subtilis* V4, эндофит из внутренних тканей черенков винограда сорта «Фетяска белая») на фоне без

азота и при внесении N_{45} независимо от погодных условий происходило увеличение урожая зерна, что связано с повышением обеспеченности азотом и стрессоустойчивости растений (Тихонович, Кожемяков, Чеботарь и др., 2005). На безазотном фоне положительное действие отмечено в приросте урожайности зерна на 25%, на фоне N_{45} – 10%.

При внесении азотного удобрения действие биопрепаратов эндофитных бактерий БП1 и БП2 выразилось в приросте урожайности зерна в большей степени в условиях избыточного выпадения осадков в первой половине вегетации 2015 г. По-видимому, это связано с влиянием бактерий, входящих в состав препаратов, которые оказывают стимулирующее воздействие на растения в экстремальных условиях, выражающееся в продуцировании ряда физиологически активных веществ (Чеботарь, Щербаков, Масленникова и др., 2016). Действие Экстрасола проявлялось только на безазотном фоне и выразилось в росте урожайности зерна в среднем на 26%.

Оценка действия исследуемых факторов на сбор соломы (табл. 6.2) показала, что применение азотного удобрения на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве оказывало наиболее существенное влияние на данный показатель: прирост составил 21–36%.

Таблица 6.2.

Влияние азотного удобрения и биопрепаратов эндофитных бактерий на массу соломы яровой пшеницы (2015–2016 гг.)

Вариант	Масса соломы, г/сосуд			Прибавка к контролю,	
	2015 г.	2016 г.	средняя	г/сосуд	%
				средняя за 2 года	
1. $P_{30}K_{45}$ –фон (Ф1)	23,4	32,2	27,8	-	-
2. Ф + Экстрасол	22,8	30,1	26,5	-	-
3. Ф + БП1	23,9	32,5	28,2	0,4	1
4. Ф + БП2	25,0	26,7	25,9	-	-
5. $N_{45}P_{30}K_{45}$ (Ф2)	31,9	38,2	35,0	7,2	26
6. Ф2 + Экстрасол	29,2	37,9	33,6	5,8	21
7. Ф2 + БП1	33,4	40,0	37,9	10,1	36
8. Ф2 + БП2	33,1	38,0	35,6	7,8	28
P, %	5,11	3,06	4,10	4,10	4,1
НСР ₀₅ А-удобрение	2,1	1,0	1,4	1,4	4
НСР ₀₅ В-биопрепарат	-	1,3	1,6	1,6	5
НСР ₀₅ част. различий	3,4	2,3	2,7	2,7	7

Оба биопрепарата (БП1 и БП2) на безазотном фоне не оказывали существенного влияния на сбор соломы. Некоторое снижение сбора массы соломы отмечено при инокуляции биопрепаратом БП2 при внесении фосфорного и калийного удобрений. При улучшении азотного питания растений яровой пшеницы инокуляция биопрепаратом БП1 повышала сбор соломы в среднем на 8%. Применение БП2 на фоне внесения N_{45} способствовало росту массы соломы в условиях избыточного выпадения осадков (2015 г.).

Хозяйственный коэффициент (доля зерна в общебиологическом урожае) определяется в первую очередь сортовыми особенностями растений яровой пшеницы, влияние условий азотного питания проявляется в

меньшей степени. Минимальный хозяйственный коэффициент отмечается у длинностебельных сортов (Гамзикова, 1994). Сорт пшеницы Злата характеризуется как растение короткое – средней длины, поэтому на фоне внесения фосфорного и калийного удобрений величина $K_{хоз}$ составила в среднем за два года 0,35 (с колебаниями 0,33–0,38) (табл. 6.3).

Применение азотного удобрения способствовало росту $K_{хоз}$ на 20%, что связано с изменением донорно-акцепторных отношений между колосом и вегетативной массой и, как следствие, увеличением доли зерна (Павлов, 1984). Биопрепараты на основе эндофитных микроорганизмов и Экстрасол способствовали увеличению $K_{хоз}$ на 17–20% на фоне фосфорного и калийного удобрений, что обусловлено улучшением азотного питания в течение всего периода вегетации. При применении минерального азота и биопрепаратов их действие нивелируется. Существенных различий между биопрепаратами на коэффициент хозяйственной эффективности не установлено.

Таблица 6.3.

Влияние азотного удобрения и биопрепаратов эндофитных бактерий на коэффициент хозяйственной эффективности урожая ($K_{хоз}$) (2015-2016 гг.)

Вариант	Коэффициент хозяйственной эффективности урожая ($K_{хоз}$)		
	2015 г.	2016 г.	Средний
1. P ₃₀ K ₄₅ –фон (Ф1)	0,38	0,33	0,35
2. Ф + Экстрасол	0,45	0,39	0,42
3. Ф + БП1	0,41	0,42	0,41
4. Ф + БП2	0,42	0,42	0,42
5. N ₄₅ P ₃₀ K ₄₅ (Ф2)	0,44	0,41	0,42
6. Ф2 + Экстрасол	0,44	0,42	0,43
7. Ф2 + БП1	0,46	0,39	0,42
8. Ф2 + БП2	0,47	0,42	0,44
P, %	3,00	4,47	2,68
НСР ₀₅ А-удобрение	0,02	0,03	0,02
НСР ₀₅ В-биопрепарат	0,02	0,02	0,02
НСР ₀₅ част. различий	0,03	0,05	0,03

Проведенный анализ условий азотного питания растений яровой пшеницы на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве с использованием программы STAT выявил роль отдельных факторов в формировании зерновой продуктивности. Основное влияние на продуктивность яровой пшеницы во все годы проведения микрополевого опыта оказали изучаемые факторы. На долю случайных факторов (неконтролируемых факторов) приходилось около 11% (табл. 6.4).

Таблица 6.4

Доля влияния факторов в формировании урожайности зерна яровой пшеницы, %

Погодные условия (А)	Азотное удобрение (В)	Инокуляция (С)	А×В	А×С	В×С	АВС	Повторений	Случайные
10,6*	57,9*	7,4*	1,9*	0,8	2,6*	7,3*	0,6	10,9

*достоверно на 5% уровне значимости.

Доля влияния основных изучаемых в опыте факторов (азотное удобрение и эндофитные биопрепараты) наиболее существенна и составляет 77,9%. По отдельности доля участия азотного удобрения в формировании урожайности зерна составила 57,9%. Роль инокуляции семян эндофитными биопрепаратами в формировании урожайности зерна существенно уступала азотному удобрению, но также достоверна и составляет 7,4%. Доля влияния взаимодействия азотного удобрения и биопрепаратов, а также погодных условий и азотного удобрения существенна на 5% уровне значимости и составляла соответственно 2,6% и 1,9%. Достоверным является и тройное сочетание факторов (погода × азотное удобрение × биопрепараты, значимость которого составила 7,3%.

Заметное влияние на эффективность применяемых агрохимикатов (азотного удобрения и биопрепаратов) оказывают погодные условия, доля которых при возделывании яровой пшеницы на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве составила 10,6%.

Содержание основных питательных элементов в урожае сельскохозяйственных культур зависит от ряда факторов, среди них определяющее место принадлежит условиям минерального питания, регулирование которых происходит за счет использования различных видов и форм удобрений (Панников, Минеев, 1987). Концентрация азота в зерне при внесении фосфорного и калийного удобрений (фон 1) составила 1,75% (табл. 6.5). При применении азотного удобрения содержание азота в зерне яровой пшеницы несколько снизилось и составило 1,63% (- 0,12% к фону), что обусловлено ростовым разбавлением (Завалин, 2005), а также погодными условиями. В 2016 г. выпадение ливневых осадков в период налива зерна послужило причиной существенного уменьшения концентрации азота (на 12% до 1,60%). Инокуляция биопрепаратами БП1 и БП2 не оказывала существенного влияния на содержание азота в зерне. Содержание азота при их применении находилось в пределах 1,65–1,73%. Действие биопрепаратов эндофитных бактерий на концентрацию фосфора и калия в зерне и соломе также не установлено. Содержание фосфора в зерне в среднем составляло 1,15–1,25%. Концентрация калия в зерне яровой пшеницы изменялась в пределах 0,63–0,72%, без существенных различий между вариантами опыта. Ливневые осадки в период созревания зерна в 2016 г. по сравнению с 2015 г. способствовали снижению содержания калия в зерне на 14%, в соломе – на 20%.

Качество зерна пшеницы, и прежде всего содержание белка, зависит от почвенно-климатических условий, сорта, предшественника, сроков сева и удобрений. Наиболее действенным фактором являются удобрения (Павлов, 1984; Завалин, Соколов, 2018). В проведенном опыте существенных различий как между вариантами, так и по годам исследований не установлено. В среднем белковость зерна пшеницы находилась в пределах 10,1–11,3%, что обусловлено низкой дозой азотного удобрения. Как правило, при использовании невысоких доз азотного удобрения увеличивается урожайность зерна, а содержание белка в зерне не изменяется, и только внесение высоких доз приводит к повышению белковости зерна (Павлов, 1984; Чеботарь, Завалин, Ариткин, 2014; Завалин, Соколов, 2018). По

данным ранее проведенных исследований содержание белка начинает существенно изменяться при дозах, превышающих 40–60 кг/га (Созинов, Хохлов, Попереля, 1976). Некоторое снижение белковости зерна в 2016 г. при внесении азотных удобрений обусловлено ливневыми осадками в июле в период налива зерна (Гамзикова, 1994). Инокуляция семян яровой пшеницы биопрепаратами не оказывала существенного влияния на белковость, но необходимо отметить положительную тенденцию к увеличению количества белка в зерне от инокуляции препаратом БП2 на фоне применения азотного удобрения в условиях ливневых осадков 2016 г. в период налива зерна, что обусловлено, по-видимому, улучшением азотного питания за счет азотфиксации (Завалин, 2005).

Таблица 6.5

Химический состав зерна и соломы яровой пшеницы и содержание в зерне сырого белка, средние за два года

Вариант	Содержание, %						Сырой белок, %		
	зерно			солома			2015 г.	2016 г.	средние
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O			
1. P ₃₀ K ₄₅ –фон (Ф1)	1,75	1,21	0,67	0,41	0,86	2,11	10,5	11,3	10,9
2. Ф + Экстрасол	1,74	1,25	0,67	0,33	0,85	2,14	10,5	11,2	10,8
3. Ф + БП1	1,70	1,18	0,63	0,40	0,84	2,02	10,3	10,9	10,6
4. Ф + БП2	1,70	1,19	0,66	0,35	0,81	2,12	10,5	10,8	10,6
5. N ₄₅ P ₃₀ K ₄₅ - (Ф2)	1,63	1,15	0,65	0,40	0,77	2,10	10,3	10,0	10,2
6. Ф2 + Экстрасол	1,70	1,16	0,72	0,32	0,80	2,11	10,7	10,6	10,6
7. Ф2 + БП1	1,65	1,21	0,66	0,36	0,81	2,15	10,5	10,1	10,3
8. Ф2 + БП2	1,73	1,23	0,69	0,37	0,83	2,15	10,5	11,1	10,8
P, %	2,25	2,42	5,35	6,13	2,41	3,91	2,80	3,24	2,25
НСР ₀₅ част. разл.	0,11	0,10	0,13	0,07	0,07	0,28	0,5	1,0	0,7

Вынос элементов питания с урожаем зерна и соломы яровой пшеницы (табл. 6.6) на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве в результате улучшения условий азотного минерального питания и инокуляции семян биопрепаратами возрастал во все годы исследований. При этом в засушливый год вынос элементов питания был минимальным. Размер накопления питательных веществ растениями яровой пшеницы зависел от потребления азота удобрений и почвенных условий. При внесении N₄₅ на фоне P₃₀K₄₅ в среднем вынос зерном азота увеличился на 60% и, как следствие, фосфора – на 56%, калия – на 67%, соломой соответственно на 25%, 13% и 20%.

Таблица 6.6

Эффективность использования растениями яровой пшеницы элементов питания, среднее за два года

Вариант	Накоплено в зерне и соломе, мг/сосуд			Локализация в зерне от общего накопления (индекс)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1. P ₃₀ K ₄₅ –фон (Ф1)	373	417	715	0,70	0,43	0,14
2. Ф + Экстрасол	413	460	692	0,79	0,51	0,18
3. Ф + БП1	448	471	693	0,75	0,50	0,18
4. Ф + БП2	410	431	671	0,78	0,52	0,18
5. N ₄₅ P ₃₀ K ₄₅ - (Ф2)	557	563	903	0,75	0,52	0,18
6. Ф2 + Экстрасол	534	559	888	0,80	0,52	0,20
7. Ф2 + БП1	596	642	999	0,77	0,52	0,18
8. Ф2 + БП2	620	641	957	0,79	0,54	0,20
P, %	2,99	3,17	3,80			
НСР ₀₅ А-удобрение	22	24	46			
НСР ₀₅ В-биопрепарат	15	34	-			
НСР ₀₅ част. разл	43	48	91			

Инокуляция семян пшеницы биопрепаратами эндофитных бактерий достоверно способствовала улучшению азотного питания растений, что выразилось в росте выноса данного элемента как на безазотном фоне, так и в варианте НРК. Накопление азота на фоне РК-удобрений при инокуляции семян эндофитными бактериями возрастало на 10–20%, на НРК несколько меньше, но тоже существенно (7–11%). Сравнение биопрепаратов эндофитных бактерий с Экстрасолом показывает, что препарат БП1 достоверно лучше на обоих фонах исследования, БП2 только на НРК. Характер влияния биопрепаратов на вынос фосфора с урожаем основной и побочной продукции на всех фонах питания стремился быть близким к таковому по азоту. В результате применения эндофитных биопрепаратов на безазотном фоне вынос фосфора возрос на 4–12%, при внесении аммиачной селитры – на 14%. Накопление в урожае яровой пшеницы калия на фоне внесения НРК несколько возрастало от действия БП1.

Важным показателем, характеризующим распределение основных элементов питания между вегетативными и генеративными органами растений, является азотный, фосфорный и калийный индекс. Индекс определяет способность генотипа к «перекачиванию» основных элементов питания в зерно, т.е. это доля азота, фосфора и калия зерна в общем их биологическом потреблении (Кандаурова, 1997). Обычно этот показатель определяется генотипическими особенностями растений, условия минерального питания воздействуют на этот показатель в меньшей степени. Однако даже незначительное увеличение азотного, фосфорного и калийного индекса можно рассматривать в качестве положительного факта.

Рассчитывается индекс по формуле, предложенной Э.Л. Климашевским (1991):

$$И_N = N_3 / (N_3 + N_{\text{солома}}), \quad И_{P_{2O_5}} = P_{2O_5_3} / (P_{2O_5_3} + P_{2O_5_{\text{солома}}}),$$

$$И_{K_2O} = K_2O_3 / (K_2O_3 + K_2O_{\text{солома}}), \quad (16)$$

где: I_{N, P_2O_5, K_2O} – азотный, фосфорный или калийный индекс;
 $N_3, P_2O_5_3, K_2O_3$ – количество азота, фосфора или калия в зерне в фазу полной спелости; $N_{\text{солома}}, P_2O_5_{\text{солома}}, K_2O_{\text{солома}}$ – количество азота, фосфора или калия в соломе в фазу полной спелости.

Изменение азотного индекса (локализация азота в зерне) находилось в зависимости от условий минерального питания и использования биопрепаратов. Под действием азотного удобрения азотный индекс возрастал с 0,7 до 0,75, эндофитных биопрепаратов – до 0,75–0,79. В связи с ростом урожайности зерна яровой пшеницы от применения азотного удобрения и биопрепаратов также возрастали фосфорный индекс от 0,43 до 0,54 и калийный индекс – от 0,14 до 0,20.

Одним из показателей эффективности применения средств химизации является окупаемость потребленных элементов питания созданным количеством зерна (в опыте мг зерна на 1 мг потребленных элементов) (табл. 6.7).

В результате применения азотного удобрения окупаемость возрастала по азоту на 16%, фосфору – на 24%, калию – на 36%. Применение препаратов эндофитных бактерий также повышало окупаемость потребленных элементов питания: азота – на 10–15%, фосфора – на 17–19%, калия – на 33–39%. Преимуществ БП1 и БП2 перед Экстрасолом в опыте не выявлено.

Таблица 6.7

Создано зерна яровой пшеницы на 1 мг потребленных элементов, мг (среднее за два года)

Вариант	Элементы питания			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	НРК
1. P ₃₀ K ₄₅ –фон (Ф1)	40	36	21	10
2. Ф + Экстрасол	46	41	27	12
3. Ф + БП1	44	42	29	12
4. Ф + БП2	46	43	28	12
5. N ₄₅ P ₃₀ K ₄₅ - (Ф2)	46	46	28	13
6. Ф2 + Экстрасол	47	45	28	13
7. Ф2 + БП1	47	43	28	12
8. Ф2 + БП2	46	44	30	13

Расчет окупаемости азотного удобрения показал, что она изменялась от применения биопрепаратов (табл. 6.8). На фоне НРК окупаемость 1 мг азота удобрения зерном составила 59 мг. Инокуляция семян Экстрасолом не влияла на окупаемость. Применение биопрепаратов эндофитных микроорганизмов повышает окупаемость азота удобрения на 20–25%.

Таблица 6.8

Окупаемость азотного удобрения прибавкой урожая зерна яровой пшеницы, мг зерна /мг N удобрения

Вариант	Окупаемость N удобрения
N ₄₅ P ₃₀ K ₄₅	59
N ₄₅ P ₃₀ K ₄₅ + Экстрасол	57
N ₄₅ P ₃₀ K ₄₅ + БП1	71
N ₄₅ P ₃₀ K ₄₅ + БП2	74

Итак, применение азотного удобрения и эндофитных биопрепаратов улучшает обеспеченность растений яровой пшеницы подвижными формами азота, что приводит к увеличению потребления N и ее продуктивности. Применение биопрепаратов эндофитных микроорганизмов на яровой пшенице способствует увеличению урожайности зерна на РК фоне на 25–33%, на NPK фоне – на 8–10%, но уступает действию азотного удобрения в дозе N₄₅. Рост урожайности зерна от внесения аммиачной селитры составил в среднем 71%. Комплексное применение азотного удобрения в дозе 45 кг/га и биопрепаратов эндофитных бактерий позволяет увеличить зерновую продуктивность яровой пшеницы в среднем в 1,7–1,9 раза.

Вынос азота с урожаем зерна и массой соломы увеличился в 1,5 раза при внесении аммиачной селитры в дозе N₄₅ на фоне применения РК-удобрения. Инокуляция семян биопрепаратами способствовала росту накопления азота в 1,1–1,2 раза на фоне РК-удобрения и в 1,1 раза на фоне внесения NPK, но меньше чем от внесения азотного удобрения. Применение азотного удобрения и эндофитных биопрепаратов увеличивает вынос азота биомассой яровой пшеницы в 1,6–1,7 раза.

Улучшение азотного питания вследствие применения азотного удобрения, Экстрасола, биопрепаратов эндофитных микроорганизмов способствовало увеличению значения азотного индекса с 0,70 до 0,75–0,80 и свидетельствует о том, что накопленный в растениях азот в большей степени локализуется в зерне.

Качество зерна пшеницы, и прежде всего содержание белка, в опыте не отличалось от применения агрохимикатов и составило 10,0–11,3 %, что связано с погодными условиями вегетации яровой пшеницы.

В результате использования азотного удобрения окупаемость потребленных элементов питания созданным количеством зерна увеличилось по азоту на 16, фосфору – 24, калию – 36%, а эндофитных бактерий – соответственно на 10–15, 17–19 и 33–39%. Инокуляция семян яровой пшеницы биопрепаратами эндофитных микроорганизмов повышает окупаемость азота удобрения на 20–25%. Максимальная окупаемость прибавкой урожая зерна N удобрения получена при применении биопрепарата БП2 – 74 мг зерна / мг N удобрения.

За счет инокуляции семян пшеницы биопрепаратом эндофитных бактерий БП 1 (*Bacillus megasterium*) увеличивается накопление азота, и в биологический круговорот вовлекается 39–75 мг/сосуд атмосферного азота (7–17% от выноса урожаем).

Глава 7. Оценка применения биопрепаратов на основе *pseudomonas* sp. на яровой пшенице

Ризосфера – зона почвы, непосредственно соприкасающаяся с корневой системой, она является основной экологической нишей для ризобактерий, в которой создаются наиболее благоприятные условия для их существования. Ризосферные и эндофитные микроорганизмы играют центральную роль в обеспечении жизнеспособности растений, способствуя

усвоению и переработке питательных веществ, регулируя гормональный баланс, обеспечивая прямую или опосредованную защиту растений от вредных организмов (например, патогенов) и абиотических стрессов (обезвоживание, воздействия тяжелых металлов) и улучшая структуру почв (Андронов и др., 2015). Среди ризосферных микроорганизмов выделяются бактерии рода *Pseudomonas*, которые благодаря наличию у них *nifH* гена принимают участие в фиксации атмосферного азота и способствуют пополнению его запасов в почве (Петюренко, 2016). Отдельные представители рода *Pseudomonas* стимулируют рост и развитие растений за счет продуцирования фитогормонов, подавления фитопатогенных микроорганизмов, увеличения доступности в почве питательных элементов, активации микробиологической азотфиксации, повышают активность других групп микроорганизмов (актиномицетов) и грибов (Шабаев, 2012; Петюренко, 2016).

Ростстимулирующие ризосферные бактерии р. *Pseudomonas* оказывают влияние на минеральное питание и потребление растениями питательных элементов из почвы. Увеличение потребления растениями элементов главным образом вследствие непосредственного влияния на их доступность в почве, а также усиления поглотительной и выделительной деятельности корневой системы, связанной с повышенной секрецией фенольных соединений. Улучшение минерального питания растений при внесении ростстимулирующих ризосферных бактерий р. *Pseudomonas* увеличивает урожай растений. Инокуляция бактериями позволяет уменьшить дозы минеральных удобрений в 1.5–3 раза при выращивании зерновых и корнеплодных растений без потерь их биомассы и исключить применение микроудобрений (Шабаев, 2012).

Исследования, проведенные с удобрениями и биопрепаратами на основе штаммов р. *Pseudomonas* на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, показали, что масса зерна яровой пшеницы зависела от применяемых удобрений и препаратов (табл. 7.1), а также варьировала по годам из-за меняющихся гидротермических условий в период вегетации. Недостаток влаги в 2018 г. в фенологические фазы всходы – выход в трубку привел к существенному снижению сбора зерна – 24–40% от среднего значения за годы исследований. На фоне РК-удобрений масса зерна в среднем составила 105,7 г/м². За счет улучшения азотного питания растений при внесении одноименного удобрения N₄₅ (Завалин, 2005; Завалин, Соколов, 2016) она возросла более чем в 2 раза, при дозе N90 – в 3,5 раза. В среднем за два года на фоне РК инокуляция семян яровой пшеницы Ризоагрином обеспечила прибавку зерна 25%, штаммом КЛ-10 (*Pseudomonas sp.*) – 33%, штаммом 17-1 (*Pseudomonas sp.*) – 22%. Таким образом, от инокуляции семян биопрепаратами ризосферных бактерий прибавка зерна была меньше, чем от азотного удобрения N₄₅, что связано с низким содержанием в почве доступных для растений соединений азота (Завалин, 2005; Завалин, Соколов, 2016; Кожемяков и др., 2011).

На величину коэффициента хозяйственной эффективности урожая существенно влияли погодные факторы периода вегетации. В 2019 г. в условиях достаточного увлажнения и благоприятного температурного

режима (ГТК 1,31) отмечено наибольшее значение этого показателя – 0,42–0,48. Засушливые условия вегетации 2018 г. способствовали уменьшению массы зерна яровой пшеницы и привели к значительному снижению хозяйственного коэффициента, который в большинстве вариантов достигал 0,32–0,42. Это обусловлено уменьшением массы зерновки и количества зерен в колосе (масса 1000 зерен снизилась на 7–12%, количество зерен в колосе – в 1,3–2,2 раза).

Таблица 7.1

Эффективность применения удобрений и биопрепаратов ризосферных бактерий на яровой пшенице, в среднем за два года

Вариант	Масса зерна, г/м ²	K _{хоз}	Прибавка зерна к контролю,		Содержание N, %		Азотный индекс, %
			г/м ²	%	зерно	солома	
1. Фон – P ₄₅ K ₄₅ (Ф) контроль	105,7	0,39	–	–	1,78	0,42	74
2. Ф + Ризоагрин (РА)	132,4	0,41	26,7	25	1,94	0,45	75
3. Ф + Штамм КЛ-10	140,1	0,40	34,4	33	1,94	0,45	74
4. Ф + Штамм 17-1	128,5	0,42	22,8	22	1,83	0,37	78
5. Ф + N ₄₅	219,7	0,42	114,0	108	1,70	0,36	77
6. Ф + N ₄₅ + РА	225,8	0,40	120,1	114	1,71	0,34	77
7. Ф + N ₄₅ + Штамм КЛ-10	243,3	0,41	137,6	130	1,82	0,35	78
8. Ф + N ₄₅ + Штамм 17-1	242,6	0,42	136,9	130	1,76	0,40	76
9. Ф + N ₉₀	369,3	0,46	263,6	249	1,83	0,37	81
P, %	4,43	3,11	4,43		2,74	3,41	
НСР ₀₅ А-удобрение	8,9	0,02	8,9		0,03	0,02	
НСР ₀₅ В-биопрепарат	20,6	0,02	20,6		0,06	0,03	
НСР ₀₅ част. различий	30,5	0,03	30,5		0,09	0,05	

На показатель K_{хоз} в большей степени влияло увеличение дозы азотного удобрения до N₉₀ на фоне P₄₅K₄₅. Его величина составила 0,46, что на 18% выше, чем на фоне РК, и обусловлено повышением доли зерна в общебиологическом урожае, что, по-видимому, связано с изменением донорно-акцепторных отношений между колосом и вегетативной массой (Завалин, Соколов, 2016). Существенных различий в значении величины K_{хоз} при применении РК и N₄₅РК не установлено. Отмечена положительная тенденция роста этого показателя при инокуляции семян яровой пшеницы биопрепаратами, особенно штаммом 17-1 (+8%).

Использование минерального азотного удобрения отразилось на распределении азота по отдельным органам яровой пшеницы. Большая часть потребленного азота накапливалась в зерне, меньшая – в соломе. В зерне при улучшении обеспеченности растений азотом в период вегетации содержалось 76–81% количества данного элемента, накопленного в урожае. Это свидетельствует об эффективном использовании растениями азота на формирование хозяйственно ценной части урожая яровой пшеницы. При недостатке азота (вариант РК) растения были вынуждены реутилизировать потребляемый азот из вегетативных органов в генеративные – зерно, особенно в условиях недостаточного или избыточного увлажнения. Об этом свидетельствует доля азота зерна – 74% общего его накопления в надземной биомассе.

Эффективность использования растениями азота оценивают по

накоплению его в растениях и прежде всего в зерне, что напрямую влияет на содержание в нем белка. Содержание азота в зерне, как и белка, подвержено большой изменчивости и зависит от условий выращивания (модификационная изменчивость) и наследственных (генотипических) особенностей (Завалин, 2003). В нашем опыте содержание азота в зерне при применении удобрений и микробных биопрепаратов составляло 1,70–1,94%. На фоне фосфорных и калийных удобрений его концентрация в зерне яровой пшеницы достигала 1,78%. При внесении азотного удобрения в дозе N₄₅ содержание азота снижалось до 1,70%, что обусловлено ростовым разбавлением. При внесении азотного удобрения в дозе N₉₀ отмечена положительная тенденция роста концентрации азота в зерне на 0,05%. Инокуляция семян яровой пшеницы биопрепаратами за счет улучшения питания растений достоверно повышала содержание азота в зерне на 0,05–0,16%.

Концентрация азота в соломе яровой пшеницы в результате применения удобрений снижалась, что обусловлено ростовым разбавлением, при инокуляции биопрепаратами – существенно не менялась.

На белковость зерна значительно влияли гидротермические условия периода вегетации (табл. 7.2). В 2018 г. при недостаточном количестве осадков в мае-июне содержание белка в зерне составляло 12,0–14,3 %. В условиях нормального увлажнения в 2019 г. оно было на 2,5–5,1% меньше. При применении азотного удобрения в дозе N₄₅ количество белка снижалось, что обусловлено ростовым разбавлением, а при дозе N₉₀ отмечена положительная тенденция его увеличения. Вместе с тем за счет роста массы зерна сбор белка при внесении N₄₅ увеличился в 2 раза, при N₉₀ – в 3,6 раза. Достоверный эффект от биопрепаратов проявился только в 2018 г. Масса зерна и сбор белка были выше при применении фосфорного и калийного удобрений и инокуляции семян биопрепаратами, чем при использовании только минеральных удобрений. Это свидетельствует об улучшении азотного питания растений за счет ассоциативной азотфиксации (РА) и ростстимулирующей активности изучаемых микробных препаратов.

Таблица 7.2
Содержание в зерне и сбор сырого белка

Вариант	Содержание сырого белка в зерне, %			Сбор сырого белка, г/м ²		
	2018 г.	2019 г.	среднее	2018 г.	2019 г.	среднее
1. Фон – P ₄₅ K ₄₅ (Ф)	12,0	9,0	10,1	9,6	11,8	10,7
2. Ф + Ризоагрин (РА)	13,1	9,9	11,1	12,5	16,8	14,7
3. Ф + Штамм КЛ-10	14,3	9,2	11,1	14,9	16,1	15,5
4. Ф + Штамм 17-1	13,3	8,8	10,4	12,3	14,5	13,4
5. Ф + N ₄₅	12,3	8,5	9,7	16,9	25,6	21,3
6. Ф + N ₄₅ + РА	12,1	8,6	9,7	18,2	25,7	22,0
7. Ф + N ₄₅ + Штамм КЛ-10	12,9	9,1	10,3	20,5	29,9	25,2
8. Ф + N ₄₅ + Штамм 17-1	11,7	9,3	10,0	17,0	31,6	24,3
9. Ф + N ₉₀	13,1	9,2	10,5	30,6	46,7	38,6
НСР ₀₅ част. различий	0,4	0,5	0,5	0,5	1,3	1,0

Вынос азота зависит от биологических особенностей культуры и почвенных условий (табл. 7.3). Применение N₄₅ способствовало увеличению

выноса азота с урожаем в среднем в 2 раза и в 3,6 раза – при N₉₀ на фоне РК-удобрения. Инокуляция семян биопрепаратами способствовала росту накопления азота в 1,2–1,4 раза на фоне РК и в 1,04–1,2 раза на фоне NPK, но увеличение было меньше, чем от внесения N- удобрения. Использование азотного удобрения и биопрепаратов увеличивало вынос азота биомассой яровой пшеницы в 2,1–2,4 раза.

Таблица 7.3

Вынос элементов питания яровой пшеницей с урожаем зерна и соломы, г/м²

Вариант	Зерно			Солома		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1. Фон – P ₃₀ K ₄₅ (Ф)	1,88	1,68	2,08	0,67	0,73	0,62
2. Ф + Ризоагрин (РА)	2,57	2,20	2,95	0,85	0,99	0,71
3. Ф + Штамм КЛ-10	2,72	2,61	2,83	0,94	1,12	0,76
4. Ф + Штамм 17-1	2,35	2,16	2,55	0,67	0,74	0,61
5. Ф + N ₄₅	3,73	2,96	4,49	1,09	1,13	1,04
6. Ф + N ₄₅ + РА	3,86	3,19	4,52	1,18	1,12	1,23
7. Ф + N ₄₅ + Штамм КЛ-10	4,43	3,59	5,24	1,24	1,14	1,34
8. Ф + N ₄₅ + Штамм 17-1	4,27	2,98	5,54	1,31	1,33	1,30
9. Ф + N ₉₀	6,76	5,37	8,19	1,61	1,43	1,79
НСР ₀₅ част. различий	0,31	0,23	0,29	0,16	0,21	0,24

Вынос фосфора и калия в большей мере определялся концентрацией их в зерне и урвнем зерновой продуктивности. При внесении азотного удобрения в дозе N₄₅ вынос фосфора возрастал в 1,8 раза, калия – в 2,2 раза. Применение N₉₀ увеличивало потребление фосфора в 3,2 раза, калия – в 3,9 раза. Инокуляция семян яровой пшеницы биопрепаратами способствовала повышению зерновой продуктивности и выноса фосфора в 1,3–1,6 раза, калия – в 1,2–1,4 раза.

Итак, применение биопрепаратов, включающих представителей рода *Pseudomonas* на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, положительно влияет на рост массы зерна яровой пшеницы, улучшает качество получаемой продукции, увеличивает окупаемость минеральных удобрений прибавкой урожая.

Глава 8. Устойчивость агроэкосистемы, потоки азота в системе удобрение – почва – растение

Оптимизация азотного питания растений и рациональное использование азота удобрений и природных ресурсов с контролем микробиологических процессов его превращения в почве являются одной и наиболее важных задач агрохимии в теоретическом и практическом аспектах (Прянишников, 1952; Смирнов, 1970; Кореньков, Лаврова, 1974; Кидин, 1993). Изучение вопросов баланса азота удобрений в почве, структуры потребления соединений азота растениями из различных источников позволяют установить закономерности трансформации азота удобрений в системе удобрение – почва – растение и оценить применяемый агротехнический прием (внесение удобрений, применение биопрепаратов). Изучение потоков

азота (минерализация, нетто-минерализация и реиммобилизация) позволяет оценить антропогенное воздействие на агроэкосистему и ее устойчивость.

В системе критериев, характеризующих режим азотного питания растений в онтогенезе, агрохимическую эффективность и экологическую рациональность применяемых удобрений, важным показателем является величина потребления азота, которая выражается в абсолютных значениях на единицу площади или продукции. В отечественной литературе эти показатели обозначаются как биологический вынос азота, затраты азота на формирование единицы основной продукции и коэффициент использования азота удобрений растениями (Завалин, Соколов, 2016).

В круговороте азота агроценоза одним из важных моментов является взаимное влияние ассоциативной азотфиксации и применяемых удобрений. К небольшим дозам азота, не превышающих физиологическую потребность растений, толерантно относятся симбиотрофные, гетеротрофные и автотрофные микроорганизмы, в то время как повышенные дозы азотных удобрений (свыше 60 кг/га) ингибирует деятельность симбиотических и несимбиотических азотфиксирующих систем (Косинова, Гантимурова, 1990; Трепачев, 1999; Шотт, 2007; Dobbelaere et al., 2002). Положительное действие ризосферных ассоциативных микроорганизмов проявляется не только на фоне внесения фосфорного и калийного удобрений, но и полного минерального удобрения (Тихонович, Завалин, 2016). Это отмечается у зерновых (Виноградова, 1999(а); Сиддики, 2001; Бердников, 2002; Сологуб, 2005; Безгодова, 2009; Никитин, 2015), кукурузы (Кодзокова, 2009), овощных культур (Ивановский, 2005), картофеля (Суров, 2015). Требуется уточнения вопрос влияния биопрепаратов на основе diaзотрофов на коэффициент использования азота удобрений.

В проведенном на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве опыте коэффициент использования азота, определенный разностным методом, в зависимости от метеорологических условий периода вегетации и условий азотного питания варьировал в пределах 17–79%. Наибольшее его значение при внесении аммиачной селитры отмечено в оптимальных метеорологических условиях вегетации (достаточное увлажнение – 2014 г.) и при недостаточном выпадении осадков (2015 г.) и составило соответственно 78 и 68%. Избыточное выпадение осадков (ГТК = 1,63) в период вегетации яровой пшеницы (2016 г.) способствовало снижению коэффициента использования азота до 54% (табл. 8.1).

Таблица 8.1
Использование яровой пшеницей азота удобрений (микрополевой опыт)

Варианты опыта	Коэффициент использования азота удобрений (КИ), %			
	изотопным методом		разностным методом	
	Биомассы	NH ₄ NO ₃	Биомассы	NH ₄ NO ₃
условия увлажнения – засушливые (ГТК=0,64), 2015 г.				
Ф + БМ	15,2	–	19,8	–
Ф + N ₄₅	–	39,5	–	67,9
Ф + БМ + N ₄₅	17,1	35,9	17,5	61,7
Ф + БМ + РА*	18,9	–	28,1	–

**Ассоциативный азот, урожай
и устойчивость агроэкосистемы**

Ф + N ₄₅ + РА*	–	44,4	–	79,0
Ф + БМ + N ₄₅ + РА*	20,7	38,3	18,4	53,1
условия увлажнения – достаточное (ГТК=1,33), 2014 г.				
Ф + БМ	36,1	–	44,2	–
Ф + N ₄₅	–	49,4	–	77,8
Ф + БМ + N ₄₅	38,6	44,4	43,4	75,3
Ф + БМ + РА*	38,2	–	46,8	–
Ф + N ₄₅ + РА*	–	57,2	–	79,0
Ф + БМ + N ₄₅ + РА*	40,8	53,1	42,9	67,9
условия увлажнения – повышенное (ГТК=1,63), 2016 г.				
Ф + БМ	18,6	–	27,6	–
Ф + N ₄₅	–	34,6	–	54,3
Ф + БМ + N ₄₅	19,9	30,9	26,3	50,6
Ф + БМ + РА*	20,8	–	30,8	–
Ф + N ₄₅ + РА*	–	38,3	–	55,6
Ф + БМ + N ₄₅ + РА*	23,1	35,8	27,2	48,2

Примечание: Ф – Фон – P₆₀K₆₀ (контроль), БМ – биомасса горчицы белой, РА – Ризоагрин, * контроль – P₆₀K₆₀+ РА

Коэффициент использования азота (КИ), определенный разностным методом, в варианте применения органического удобрения (биомассы горчицы белой) определен существенно ниже, чем при внесении минерального удобрения и составлял: в 2014 г. – 44%, в 2015 г. – 20% и в 2016 г. – 28%. Изменение его обусловлено тем, что азот минеральных удобрений используется непосредственно растением в начальный период их развития. В дальнейшем в дерново- подзолистой почве азот минерального удобрения поглощается почвенными микроорганизмами и отчасти минерализуется и усваивается растениями непосредственно в год внесения в ходе вегетации (Турчин, 1972). По данным А.А. Завалина и О.А. Соколова (2016), скорость иммобилизации азота минеральных удобрений микроорганизмами в 3,5–5,4 раза превышает скорость минерализации микробной массы и, следовательно, часть азота минерального удобрения поступает в растения не непосредственно, а проходя через иммобилизационно-минерализационные превращения, обусловленные деятельностью почвенной микрофлоры. Азот биомассы сидерата становится доступным культурным растениям только после его микробиологической минерализации, которая зависит от многих факторов (температуры воздуха и почвы, влажности и аэрации почвы) (Емцев, Ницэ, Покровский, 1985). В нашем опыте коэффициент использования азота в варианте Фон + N₄₅ при метеорологических условиях близких к оптимальным (2014 год) составил на 76 относительных % выше, чем у органического удобрения. В засушливых условиях 2015 г. различия КИ между вариантами с применением биомассы горчицы белой и аммиачной селитры составили 3,4 раза в пользу минерального удобрения. В условиях избыточного увлажнения различия были меньше и составили 1,9 раза.

Совместное применение аммиачной селитры и тонкоизмельченной биомассы горчицы белой способствовало некоторому снижению КИ азота минерального удобрения в зависимости от метеорологических условий периода вегетации на 2,5–6,2%. Наименьшее снижение отмечено при

условиях, близких к оптимальным (2014 г.). Стрессовые условия (засуха или избыток влаги в виде осадков) способствовали более существенному снижению КИ азота аммиачной селитры. Некоторое уменьшение использования азота аммиачной селитры при ее внесении с биомассой горчицы связано с иммобилизацией азота, которая зависит от соотношения C : N в органическом удобрении (Лошаков, 2012).

Расчет коэффициента использования азота удобрения с помощью разностного метода дает представление об интенсивности потребления азота растениями (из удобрения и почвы) и эффективности применяемых удобрений, но не отражает истинные величины использования азота удобрениями, что делает его непригодным для балансовых расчетов слагаемых круговорота азота в системе почва–растения (Завалин, Соколов, 2016). Дополнительно используемый растениями азот почвы в вариантах с удобрениями обуславливает более высокие коэффициенты использования азота удобрениями, определенные с помощью разностного метода, по сравнению с коэффициентами, полученными изотопным методом. Это погрешность разностного метода, который учитывает и «экстра-азот». Более точное представление о количестве используемого растениями азота из удобрения дает коэффициент, определенный с помощью изотопного метода. В микрополевом опыте для аммиачной селитры при оптимальных метеорологических условиях вегетации (2014 г.) коэффициент использования яровой пшеницей азота находился в зависимости от вариантов опыта в пределах 44–53%, для органического удобрения (биомасса горчицы) несколько меньше – 36–39%. Совместное применение аммиачной селитры и биомассы горчицы несколько снижало коэффициент использования азота минерального удобрения на 4–5% в зависимости от погодных условий, в то время как коэффициент использования азота органического удобрения возрастал. Это связано с процессами минерализации растительной массы горчицы и иммобилизацией азота аммиачной селитры. Биологическая иммобилизация азота минерального удобрения протекает наиболее активно при широком соотношении в органическом удобрении C : N – больше 30, что хорошо заметно при использовании соломы зерновых культур (C : N = 40-80:1) (Лошаков, 2012). При C : N равном 10 иммобилизация азота минерального удобрения ослабевает или отсутствует. В проведенном опыте биомасса горчицы содержала C : N равное 25:1, что, по-видимому, повлияло на коэффициент использования азота аммиачной селитры. Так, по данным В.В. Серегина (2000), совместное применение растительной массы с соотношением C : N = 24 : 1 и аммиачной селитры приводило к снижению КИ азота из минерального удобрения с 46% до 21–24%. Подобное явление наблюдали и другие исследователи. А.И. Осипов и О.А. Соколов (2001) отмечали, что при соотношении C : N равном 21 минерализация органических веществ в почве практически прекращается.

Одна из задач проводимого полевого эксперимента состояла в необходимости выяснить влияние микробиологических препаратов ассоциативных бактерий на процесс использования азота удобрений. Полученные экспериментальные данные с использованием изотопа ^{15}N показали, что при инокуляции семян яровой пшеницы препаратом

Ризоагрин коэффициент использования азота минерального удобрения возрастал на 4–8%. При совместном применении аммиачной селитры и биомассы горчицы наблюдалась также положительная тенденция роста коэффициента использования азота NH_4NO_3 на 2–9%. Влияние ассоциативных микроорганизмов на использование азота минерального удобрения может быть объяснено тем, что они включаются в процесс трансформации азота в почве – увеличивая концентрацию доступного азота и способствуя усилению поглощения данного элемента культурным растением (Завалин, 2005). Более высокое увеличение коэффициента использования азота аммиачной селитры при инокуляции Ризоагрином в 2014 году объясняется лучшими метеорологическими условиями. По мнению Е.П. Трепачева (1999), наибольшая активность несимбиотических азотфиксаторов проявляется при температуре от 20 до 30°C и влажности не ниже 60% от полной влагоемкости. Низкая положительная (менее 20°C) и высокая температура (более 30°C) угнетает азотфиксацию (Емцев, Ницэ, Годова, 1985).

Что касается влияния Ризоагрина на коэффициент использования азота яровой пшеницей из органического удобрения, то результаты опыта показали только некоторую тенденцию к его росту (2-3%). Несколько большее увеличение КИ азота из растительной массы горчицы в 2015 году (+5%), по-видимому, связано с запасами влаги в почве и оптимальными температурными значениями в мае месяце (содержание продуктивной влаги в слое 0–40 см составило 61,2 мм).

В целом положительная роль биопрепаратов на основе штаммов диазотрофов на коэффициент использования азота удобрения (минерального или органического), по-видимому, объясняется тем, что бактерии-дiazотрофы стимулируют рост фитомассы растений, продуцируют фитогормоны, улучшают минеральное питание, водный обмен и активизируют другие физиологические процессы растений (Кожемяков, Тимофеева, Попова, 2008; Завалин, Алметов, 2009, Тихонович, Завалин, Благовещенская и др., 2011).

Эффективное использование азота удобрений возделываемыми культурами играет определяющую роль как в сохранении плодородия почвы, получении экологической безопасной продукции, так и охране окружающей среды. Чем лучше культурное растение использует азот удобрения, азот почвы и активнее усваивает поглощенное его количество, тем выше агрохимическая эффективность применения удобрений и ниже экологическая напряженность в агроландшафте (Соколов, Семенов, 1994). Нарядом с потреблением азота из почвы и удобрения сельскохозяйственными культурами существенное влияние оказывает целый ряд факторов: видовая спецификация культуры, сорт, тип почвы и ее плодородие, погодные условия, агротехника возделывания, действие которых может быть как прямым, так и косвенным (Завалин, Соколов, 2016).

Нечерноземная зона России включает в себя целую палитру почв, отличающихся по уровню естественного плодородия и по своим агрохимическим свойствам, что оказывает важное влияние на эффективность азотных удобрений (определяется характером трансформации азота, его

иммобилизации органическим веществом почвы и величиной потерь). С увеличением уровня естественного плодородия почвы изменяется соотношение азота удобрений и почвы в общем выносе азота с урожаем сельскохозяйственных культур в сторону увеличения относительного содержания азота почвы (Руделев, 1992). Поэтому так важно оценивать эффективность применяемых агрохимикатов (удобрений и биопрепаратов) для каждой почвенной разности.

В проведенном микрополевом опыте на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с содержанием гумуса 1,98–2,04% использование яровой пшеницей почвенного азота составило 5,7 г/м² (табл. 8.2). В целях лучшего представления экспериментального материала в дальнейшем результаты опыта даны в г/м² (площадь сосуда = 0,018 м²).

Естественной реакцией почвы на внесение удобрений как саморегулирующей системы, стремящейся к гомеостазу и определенному динамическому равновесию содержания азота, является активизация процессов внутрпочвенного цикла трансформации азота, в том числе минерализации и иммобилизации (Осипов, Соколов, 2001). Видовые и сортовые особенности возделывания культуры влияют на процессы трансформации азота удобрений и почвы. С одной стороны, азотные удобрения выступают в роли регулятора процессов минерализации – иммобилизации, а с другой – способствуют дополнительному потреблению азота почвы растениями (Турчин, 1972; Кореньков, 1976; 1999; Завалин, 2003; Пасынкова, 2013).

Основную роль в обеспечении растений азотом играет азот почвы, поскольку 70–80% от общего количества потребления азота растением составляет азот почвы (Соколов, Семенов, Агаев, 1990; Осипов, Соколов, 2001). При внесении азотных удобрений усиливается минерализация почвенного органического вещества и поэтому возрастает доступность растениям азота почвы. К моменту уборки в вариантах с азотными удобрениями усвоение азота почвы составило почти в 1,2 раза больше, чем на контроле, при этом доля почвенного азота в выносе составила 79%. Подобное явление отмечалось и при применении биомассы горчицы, которая также способствовала усилению минерализации органического вещества почвы – в 1,2 раза, но доля почвенного азота в выносе составляла немного меньше – 69%. При совместном применении азотного удобрения и сидерата рост минерализации органического вещества почвы составил 1,3 раза, а доля почвенного азота в выносе – 60%. Расчетная доля дополнительного азота в среднем в зависимости от вида удобрений варьировала и составляла 9–14% от выноса: больше она составляла при внесении минеральных удобрений («экстра»-азот) и меньше при применении биомассы горчицы. При совместном их применении доля «экстра»-азота в среднем составила 15%. В варианте с аммиачной селитрой усиление образования «экстра»-азота происходит в засушливый год (18%) и меньше в благоприятный по метеорологическим условиям (11%). В варианте с биомассой горчицы: максимально дополнительный азот почвы в выносе отмечен при избыточном увлажнении (13%) и меньше в засушливых (9%) и оптимальных (8%) метеоусловиях.

Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы

Таблица 8.2

Потребление азота яровой пшеницей при применении биомассы горчицы, NH_4NO_3 и инокуляции семян Ризоагрином (средние за 3 года)

Вариант	Общий вынос N, г/м ²	N удобрения				N почвы, г/м ²		Ассоциативный N, г/м ²
		Биомасса горчицы		NH_4NO_3		всего	Дополнительный азот	
		г/м ²	% от внесенного	г/м ²	% от внесенного			
1. Фон – P ₆₀ K ₆₀ (Ф) - контроль	5,7	–	–	–	–	5,7	–	–
2. Ф + Биомасса (БМ)	9,6	3,0	23,5	–	–	6,6	0,9	–
3. Ф + N ₄₅	8,7	–	–	1,9	41,2	6,9	1,2*	–
4. Ф + БМ + N ₄₅	12,4	3,2	25,5	1,7	37,0	7,5	1,8*	–
5. Ф + Ризоагрин (РА)	6,7	–	–	–	–	6,7	–	1,0
6. Ф + БМ + РА	11,2	3,3	26,2	–	–	7,9	0,9	1,3
7. Ф + N ₄₅ + РА	10,0	–	–	2,1	46,6	7,9	1,2*	1,0
8. Ф + БМ + N ₄₅ + РА	13,8	3,6	28,5	1,9	42,4	8,3	1,8*	0,8

*«экстра»-азот.

Увеличение использования азота почвы при внесении аммиачной селитры объясняется тем, что образующиеся при нитрификации минерального удобрения кислотные продукты «усиливают гидролиз почвенного азота и тем самым повышают его подвижность» (Турчин, 1972; Завалин, Соколов, 2016). Повышение использования растениями азота почвы при внесении биомассы горчицы связано с поступлением в почву легкодоступных органических соединений, которые способствуют росту микробиологической активности почвы – нитрификации, денитрификации (Мишустин, Шильникова, 1968; Мишустин, 1975).

По данным ранее проведенных исследований с применением ¹⁵N зерновые культуры в первый год используют 30–50 % азота из минерального удобрения (Варюшкина, 1967; Смирнов, 1970; Кореньков, 1976; Кидин, 1993; Гамзиков, Муравин, Будажапов, 2008; Гамзиков, 2013; Завалин, Соколов, 2016), из органических удобрений – 10–30% (Кидин, 2008; Серегин, 2000, Никифорова, 1998). В нашем опыте применение изотопа ¹⁵N позволило определить количество поглощенного растениями азота удобрений. В частности, яровая пшеница к моменту уборки использовала азота азотного удобрения 35–49%, биомассы горчицы – 14–36% от внесенного количества. При совместном применении аммиачной селитры и органического удобрения яровая пшеница использовала азота минерального удобрения 30–44%, биомассы горчицы – 17–39%.

Немалое влияние на потребление азота почвы и удобрения оказывают

погодные условия вегетации яровой пшеницы. Особенно важное значение имеет сумма осадков, которая воздействует на водный режим почвы и влияет на процессы микробиологической минерализации и иммобилизации азота (Петер, 1990; Осипов, Соколов, 2001). В засушливый 2015 г. использование азота минерального удобрения составило 1,8 г/м², в то время как в благоприятный 2014 г. – 2,3 г/м². Использование яровой пшеницей азота почвы составило соответственно 5,5 и 9,4 г/м². Подобное наблюдалось и при внесении биомассы горчицы. В условиях достаточного выпадения осадков и температур, близких к среднегодовым значениям (2014 г.), потребление азота биомассы горчицы составило 4,7 г/м², в засушливый 2015 г. – 1,9 г/м² и избыточно влажный (2016 г.) – 2,3 г/м². Использование яровой пшеницей азота почвы в этом варианте составило соответственно 9,2, 4,8 и 5,8 г/м². При совместном применении минерального удобрения и биомассы горчицы потребление азота удобрений отмечено соответственно 7,1, 3,7 и 4,3 г/м², а азота почвы соответственно 10,2, 6,1 и 7,4 г/м². Более низкие показатели потребления азота в засушливых условиях 2015 г., по-видимому, связаны, с одной стороны, с тем, что растения испытывали недостаток влаги (недостаток влаги отмечен в критический период – фаза трубкования) и, как следствие, снижение потребления азота и урожайности (Гамзиков, 2013), с другой – недостаток влаги в почве снижает интенсивность процессов микробиологической минерализации азота, доступного для питания растений. Особенно это важно во второй половине вегетации, когда основное потребление растением идет за счет азота почвы (Завалин, Соколов, 2016). Избыток осадков в 2016 г. носил ливневый характер, и снижение потребления азота, по-видимому, обусловлено снижением интенсивности процесса нитрификации и, как следствие, уменьшение накопления нитратов в почве.

Соотношение использования яровой пшеницей азота удобрения к азоту почвы для аммиачной селитры установлено в пределах 0,24–0,32 : 1, а для биомассы горчицы – 0,34–0,51 : 1, при совместном использовании – 0,68–0,71 : 1. Более высокое использование азота биомассы горчицы к азоту почвы по сравнению с аммиачной селитрой объясняется дозой внесения. С биомассой горчицы в почву вносилось 217–233 мг/сосуд азота, в то время как с аммиачной селитрой только 81 мг/сосуд.

Одна из важных задач, поставленных в исследовании, состояла в определении размеров ассоциативной азотфиксации в посевах культурного растения. Применение модифицированного разностного метода с использованием ¹⁵N в применяемых удобрениях позволило определить количество азота, фиксированного *Agrobacterium radiobacter* (штамм 204) (Ризоагри) в дерново-подзолистой почве. В среднем за три года исследований инокуляция семян Ризоагрином в посевах яровой пшеницы обеспечила фиксацию 1,0 г/м² азота воздуха. Действие diazотрофов, как и любых микроорганизмов, подвержено влиянию температуры и влажности почвы, поэтому отмечались колебания фиксации атмосферного азота микроорганизмами по годам от 0,4 в засушливом 2015 г. до 2,0 г/м² в 2014 г. (условия увлажнения приближены к оптимальным).

Применение азотных удобрений не уменьшает размеры использования

ассоциативного азота. В проведенном эксперименте они состояли на уровне варианта РК-удобрений, т.е. дополнительное внесение азотного удобрения не снижает использования растением биологического азота. По мнению М.М. Умарова (1986, 2009), азотные удобрения, стимулируя рост растений на первых этапах развития и повышая продуктивность фотосинтетического аппарата, способствуют, после удаления избытка минеральных соединений азота в почве в результате потребления их растениями и микроорганизмами, просачивания в грунтовые воды (при промывном водном режиме) и закрепления в кристаллических решетках почвенных минералов, возрастанию ассоциативной азотфиксации на последующих стадиях развития растений. Скорость протекания указанных процессов определяется уровнем биологической активности почв.

Некоторое снижение количества ассоциативного азота, определенное модифицированным разностным методом, при внесении азотных удобрений в 2016 г. по сравнению с 2014 и 2015 гг. связано со значительным выпадением осадков в период вегетации (130% от среднемноголетнего значения). Это снижение можно объяснить тем, что процессы ассоциативной азотфиксации и денитрификации осуществляются в одних и тех же условиях – оба процесса активизируются при наличии легкодоступного субстрата и дефицита кислорода. При наличии в почве нитратов в этих условиях азотфиксирующие микроорганизмы выступают в роли денитрификаторов (Степанов, 1985; Умаров, 1986).

Внесение в почву биомассы горчицы оказало существенное влияние на ассоциативную азотфиксацию. Применение массы горчицы, богатой сахарами и другими углеводами, а также легкоразлагаемыми соединениями углерода создает благоприятные условия для активизации сапрофитной микрофлоры в почве, повышает ее биологическую активность, в том числе и азотфиксирующую способность (Лошаков, 2012). Наличие в биомассе легкоразлагаемых соединений углерода, которые необходимы диазотрофам, послужило причиной роста фиксации азота. В варианте с инокуляцией семян яровой пшеницы Ризоагрином и применением биомассы горчицы количество ассоциативного азота составило в среднем $1,3 \text{ г/м}^2$, с изменением по годам исследований от $0,8$ до $2,1 \text{ г/м}^2$ и в пересчете на 1 га это составляет $8\text{--}21 \text{ кг}$.

В варианте РК + БМ + N_{45} + РА количество ассоциативного азота составило $0,8 \text{ г/м}^2$ (8 кг/га) (меньше чем в других вариантах опыта), что может быть связано с микробиологическими процессами нитрификации, денитрификации и азотфиксации. Усиление микробиологической активности при применении органических и минеральных удобрений может привести к тому, что ассимилированный бактериями азот атмосферы подвергается быстрой минерализации и не только усваивается растениями, но и теряется в процессе денитрификации (Трепачев, 1999).

Таким образом, инокуляция семян яровой пшеницы Ризоагрином в зависимости от метеорологических условий и применения удобрений способствует накоплению от 8 до 21 кг/га азота.

Баланс азота удобрений в почве складывается из использования его растениями, закрепления в почве и потерь (газообразных и водно-

миграционных). Применение в исследованиях удобрений, меченных изотопом ^{15}N , дает возможность проследить за их превращениями и рассчитать баланс. Многочисленными исследованиями с применением ^{15}N установлено, что в год внесения только часть азота удобрений используется растениями, значительное количество азота удобрений не используется – часть закрепляется микрофлорой почв или связывается в составе органического вещества и фиксируется глинистыми минералами, остальная – теряется (Турчин, 1972; Замятина, Кореньков, Варюшкина и др., 1963, Замятина, Варюшкина, Зерцалов, 1965; Варюшкина, 1967; Смирнов, 1970; 1973; Смирнов, Шилова, Хон, 1972; Кореньков, Лаврова, 1974, 1992; Мишустин, 1972, 1975; Кореньков, Романюк и др., 1975; Кореньков, 1976, 1999; Гамзиков, 1981, 2013; Руделев, 1992; Лаврова, 1992; Помазкина, 1985, 2004; Кудеяров, 1989; Муравин, 1991; Семенов, 1996; Семенов, Кузнецова, Кудеяров, 1995; Осипов, Соколов, 2001; Назарюк, 2002, 2004; Шабаев, 2004; Евдокимов, Саха и др., 2005; Гамзиков, Муравин, Будажапов, 2008; Помазкина, Котова и др., 2008, Помазкина, Соколова и др., 2011; Соколов, Шмырева, 2009; Сычев, Соколов, Шмырева, 2009; Будажапов, 2009; Завалин, Соколов, 2016; Barradough et al., 1984; Olson, 1987; Patra et al., 1987; Lindberg et al., 1989; Jensen B. et al., 1999; Ibewiro et al., 2000; Glendining et al., 2001; Ichir et al., 2003; Janzen et al., 2003; Mallory et al., 2010; Regehr et al., 2015).

На современном этапе развития науки, по мнению Л.В. Будажапова (2009), внутрипочвенные превращения азота рассматриваются как совокупность параллельных, последовательных и тесно взаимосвязанных процессов, которые поддерживаются абиотическими и биотическими признаками и включают серию различных по величине и скорости процессов. Среди последних выделяются растворение и усвоение растениями, иммобилизация и реминерализация, фиксация минералами N-NH_4^+ и дефиксация, нитрификация, денитрификация, улетучивание аммиака, нисходящая миграция и поверхностный сток, химическое и микробное восстановление до газообразных форм, включение в состав гумуса (Смирнов, 1970, 1972, 1973, 1977; Кореньков, 1976, 1999; Гамзиков, 1981, 2013; Помазкина, 1985; Кудеяров, Биелек, Соколов и др., 1986, Кудеяров, 1989; Лаврова, 1992; Муравин, 1991; Руделев, 1992; Завалин, 1991; Кидин, 1993; Семенов, 1996; Сычев, Соколов и др., 2012; Завалин, Соколов, 2016; Barradough et al., 1984; Trehan et al., 1993; Burger et al., 2003; Janzen et al., 2003; Redin et al., 2014).

Результативность вышеуказанных оценок трансформации азота удобрений сводится к построению баланса азота удобрения, который позволяет выявить направленность его превращений в системе почва – растение (Будажапов, 2009). Исследованиями, проведенными в европейской части России, установлено, что размеры использования азота минеральных удобрений не превышают в среднем 30–40%, иммобилизация составляет 20–30% с потерями 15–30% от внесенного (Смирнов, 1970; Кореньков, 1976, 1999; Муравин, 1991; Руделев, 1992; Кидин, 1993). Для органических удобрений в первый год после применения размеры использования азота не превышают 9–30%, иммобилизация составляет 40–60% с потерями 25–40% от внесенного (Варюшкина, Кирпанева, 1984; Никифорова, 1998; Кидин, 2011). При инокуляции сельскохозяйственных культур биопрепаратами ассоциативных

диазотрофов размеры использования азота минеральных удобрений существенно разнятся: у яровой пшеницы – 16–58%, ячменя – 20–70% (Кандаурова, 1997; Сиддики, 2001; Бердников, 2002; Волков, 2003; Сологуб, 2005; Безгодова, 2009). Вместе с тем остаются вопросы трансформации азота удобрений в зависимости от погодных условий и типа почв.

Баланс азота применяемых удобрений (табл. 8.3) в среднем за три года исследований складывался следующим образом. Растениями яровой пшеницы использовалось около 41% азота аммиачной селитры и 24% азота биомассы сидерата при раздельном их применении. При совместном их применении использовалось из аммиачной селитры 37% и из биомассы горчицы – 26%. В слое 0–20 см иммобилизовалось соответственно 27 и 52% при раздельном внесении и 33 и 47% при совместном использовании удобрений.

Существенной статьей баланса азота являются потери. Потери азота из почвы в газообразной форме и при вымывании в нижележащие слои являются основной причиной снижения коэффициента использования азота растениями и эффективности удобрений во всех климатических зонах страны (Кореньков, 1976, 1999; Смирнов, 1973; Гамзиков, 1981, 2013; Кидин, 1993; Завалин, Соколов, 2016). В нашем опыте неучтенные потери азота при вымывании в нижележащие слои почвы и газообразные потери (молекулярный азот, его окислы и аммиак) составили соответственно 32 и 25%. При совместном применении аммиачной селитры и биомассы горчицы повышалось использование яровой пшеницей азота горчицы и его газообразные потери, а также снижалось закрепление этого элемента в почве, а для минерального удобрения – несколько снижалось использование вследствие повышения иммобилизации и уменьшались потери.

Существенное влияние на абсолютные значения процессов использования азота, его иммобилизации и потери оказывали погодные условия. Баланс азота удобрений в первый год проведения опыта (2014 г.) складывался следующим образом. Растениями яровой пшеницы использовалось около 49% азота аммиачной селитры и 36% азота биомассы сидерата при раздельном их применении. При совместном их применении использовалось из аммиачной селитры 44% и из биомассы горчицы – 39%. В слое 0–20 см иммобилизовалось соответственно 32, 52% при раздельном внесении и 38 и 48% при совместном использовании. Неучтенные потери азота при вымывании в нижележащие слои почвы и газообразные потери (молекулярный азот, его окислы и аммиак) составили соответственно 19 и 12%. При совместном применении минерального удобрения и биомассы горчицы потери азота из аммиачной селитры снижались на 2%, а из органического удобрения возрастали на 1,5%. Такое явление объясняется тем, что при внесении на фоне применения биомассы аммиачной селитры усиливаются процессы минерализации органического вещества удобрения и, как следствие, повышалось использование яровой пшеницей азота горчицы и его газообразные потери, а также снижалось закрепление этого элемента в почве. Азот минерального удобрения частично использовался на иммобилизацию биомассы горчицы. В целом состояние баланса азота удобрений в условиях меньшей экстремальности режимных процессов

дерново-подзолистой почвы, связанной с погодой, отличалось наибольшим использованием вносимого азота применяемых удобрений при высоких размерах иммобилизации.

Таблица 8.3

Баланс азота удобрений при выращивании яровой пшеницы
(средний за три года)

Вариант	Доза N, г/м ²	Использовано растениями N		Закреплено в 20 см слое почвы		Потери из 20 см слоя почвы	
		1	2	1	2	1	2
Ф + Биомасса (БМ)	12,6	<u>3,0</u> 23,5	—	<u>6,5</u> 51,6	—	<u>3,1</u> 24,9	—
Ф + N ₄₅	4,6	—	<u>1,9</u> 41,2	—	<u>1,2</u> 26,5	—	<u>1,5</u> 32,3
Ф + БМ + N ₄₅ *	17,2	<u>3,2</u> 25,5	<u>1,7</u> 37,0	<u>5,9</u> 46,9	<u>1,5</u> 32,5	<u>3,5</u> 27,7	<u>1,4</u> 30,5
Ф + БМ+ РА	12,6	<u>3,3</u> 26,2	—	<u>6,7</u> 52,8	—	<u>2,6</u> 21,0	—
Ф + N ₄₅ + РА	4,6	—	<u>2,1</u> 46,6	—	<u>1,2</u> 26,9	—	<u>1,2</u> 26,5
Ф + БМ + N ₄₅ + РА*	17,2	<u>3,6</u> 28,5	<u>1,9</u> 42,4	<u>6,3</u> 50,0	<u>1,5</u> 33,4	<u>2,7</u> 21,5	<u>1,1</u> 24,2

Примечание: Фон – P₆₀K₆₀ (Ф) – контроль; РА – Ризоагрин; числитель – г/м², знаменатель – % от внесенного с удобрением; 1 – из биомассы сидерата, 2 – из азотного удобрения.

* при совместном применении расчет ведется отдельно по каждому виду удобрений.

Несколько иное количество азота использовалось и иммобилизовалось в 2015 г. Яровая пшеница использовала на образование продуктивной части урожая (зерно + солома) около 40% азота аммиачной селитры и только 15% азота биомассы сидерата. В пахотном слое почвы (0–20 см) иммобилизовалось соответственно 32 и 59%. Неучтенные потери азота составили соответственно 29 и 28%.

2016 г. по статьям баланса азота отличался от двух предыдущих и складывался следующим образом. Растения яровой пшеницы использовали около 35% азота минерального удобрения и 19% азота биомассы сидерата при раздельном их применении. Количество иммобилизованного азота в пахотном слое почвы составило соответственно 16 и 44%. Количество неучтенных потерь азота было соответственно 50 и 37%.

Столь существенные различия по годам исследований связаны с разными погодными условиями периода вегетации выращивания яровой пшеницы. Приближенные к оптимальным погодные условия 2014 г. (ГТК=1,3, количество осадков соответствовало среднегодовому значению) позволили не только увеличить использование азота удобрений и азота сидерата растениями яровой пшеницы, но и вследствие повышенной микробиологической активности почвы значительно иммобилизовать азот. Недостаток выпадения осадков в июне-июле 2015 г. уменьшал использование азота удобрений яровой пшеницей, а вследствие низкой влажности почвы микробиологическая активность могла быть высокой только в мае месяце (достаточно высокие запасы продуктивной влаги, накопленные за зимне-весенний период).

Объяснение вышесказанного с азотом аммиачной селитры в 2015 г. дано в ранее проведенных исследованиях с минеральными удобрениями – основные превращения внесенного в почву азота минеральных удобрений происходят в первые недели вегетации культурного растения (3–4 недели). К этому времени отмечаются основные потери азота минеральных удобрений и значительный переход его в органические соединения почвы, поэтому существенное влияние на процесс использования и иммобилизацию в почве азота удобрений оказывают погодные условия и гранулометрический состав почвы (Смирнов, 1970; Кореньков, 1976, 1999; Кудеяров, 1989; Шевцова, 1988; Завалин, 1991; Кидин, 1993). Иммобилизованный азот минерального удобрения при низкой микробиологической активности почвы в середине вегетации вследствие низкой влажности почвы мало минерализуется и незначительно используется растениями (Шевцова, 1988; Варюшкина, Кирпанева, 1984).

Деятельность ассоциативных diaзотрофов оказывает влияние на активность процессов внутрипочвенного цикла трансформации азота, в том числе минерализацию и иммобилизацию азота удобрений и почвы. При инокуляции Ризоагрином семян яровой пшеницы при применении растительной массы горчицы в среднем за три года наблюдалась положительная тенденция использования из нее азота на $0,3 \text{ г/м}^2$ (+2,7% от внесенного количества), а также закрепления азота удобрения в почве на $0,2 \text{ г/м}^2$ (+1,2%), что способствовало снижению потерь на $0,5 \text{ г/м}^2$ (на 3,9%).

Несколько иная картина наблюдалась при инокуляции семян яровой пшеницы Ризоагрином в варианте применения аммиачной селитры. Ассоциативные diaзотрофы способствовали росту использования азота из минерального удобрения ($+0,2 \text{ г/м}^2$ или +5,4%) и не оказывали влияния на процессы иммобилизации азота удобрения в почве.

При совместном применении биомассы горчицы и аммиачной селитры инокуляция Ризоагрином семян яровой пшеницы повышала использование и иммобилизацию азота из зеленого удобрения на 3%, использование азота из азотного удобрения на 5%. Как следствие, снижение потерь азота из массы горчицы на 6% и из аммиачной селитры – на 5%.

Таким образом, внесение в почву растительной массы горчицы с соотношением C : N = 25:1 обогащает почву азотом в результате процесса иммобилизации на $6,5 \text{ г/м}^2$ (52% от дозы внесения азота). Применение азотного удобрения обогащает почву азотом всего на $1,2 \text{ г/м}^2$, чего недостаточно для поддержания динамического равновесия почвы по азоту, т.к. для получения зерна яровой пшеницы с соответствующим количеством соломы минерализуется почвенного азота по результатам опыта от $6,6$ (вариант с горчицей) до $6,9 \text{ г/м}^2$ (вариант с аммиачной селитрой).

Инокуляция Ризоагрином яровой пшеницы повышает использование азота горчицы на $0,3 \text{ г/м}^2$ (+3% от внесенного количества), азота минерального удобрения ($+0,2 \text{ г/м}^2$ или +5,4%) и способствует росту иммобилизации азота горчицы на $0,2 \text{ г/м}^2$ (+1,2%), а потери азота из растительной массы горчицы уменьшает на $0,5 \text{ г/м}^2$ (сокращение на 4,3%).

Определение динамики потребления азота сельскохозяйственными растениями в онтогенезе является основой для разработки технологий

применения агрохимикатов, обеспечивающих синхронизацию доступности почвенного азота и азота удобрений и биопрепаратов онтогенетическим этапом его использования возделываемыми культурами (Завалин, Соколов, 2016).

Поступление азота в ходе вегетации растений пшеницы осуществлялось неравномерно. По мере прохождения фаз развития растений в условиях вегетации происходило возрастание накопления азота растениями яровой пшеницы (табл. 8.4). Минимальное количество азота удобрения пшеница потребляла и использовала в фазу кущения, которое увеличивалось в цветение, достигая максимального значения в фазу полной спелости. В фазу кущения при внесении по фону РК-удобрения лучше поглощался азот азотного удобрения, из которого в фитомассу перешло около 14% азота, из сидерата горчицы только 4,2–4,5%. Значительная часть азота как аммиачной селитры (75–76%), так и зеленого удобрения (87–88%) в эту фазу закрепились в почве, а неучтенные потери составляли 10–11% и 8–8,5% соответственно.

Высокая доля мобилизованного азота применяемых удобрений обусловлена его поглощением почвенными микроорганизмами (Турчин, 1972; Кореньков, 1996; Семенов, Бруггер и др., 2002; Семенов, Иванникова, Тулина, 2009; Blankenau et al., 2000). Более высокая мобилизация азота биомассы горчицы связана с тем, что ключевым элементом в трансформации азота удобрения является зависимость скорости его ассимиляции микроорганизмами от соотношения С:N. При С:N = 20 и более иммобилизация идет интенсивно (Кузнецова, Ходжаева, Семенова и др., 2006). Доля меченого азота в общем количестве потребленного азота яровой пшеницей в варианте применения азотного удобрения составила 16–18%, при внесении горчицы белой – 15%, а доля немеченого азота почвы соответственно 84–88% и 85% (табл. 8.5), что подтверждает ведущую роль почвенного азота в формировании фитомассы культурного растения на ранних фазах онтогенеза. При внесении азотного удобрения и биомассы горчицы доля меченого азота удобрений в выносе увеличивается до 24%, а почвы по сравнению с раздельным внесением зеленого удобрения и аммиачной селитры уменьшается до 76%.

Таблица 8.4
Динамика баланса азота удобрений (средние за 3 года), % от внесенного

Показатель	Вариант	Фаза вегетации растений					
		кущение		цветение		полная спелость	
		БМ	N _A	БМ	N _A	БМ	N _A
Вынос ¹⁵ N удобрений	Ф + БМ	4,2	–	20,9	–	23,5	–
	Ф + N ₄₅	–	14,0	–	37,3	–	41,2
	Ф + БМ+ N ₄₅	4,5	13,8	22,1	33,7	25,5	37,0
	Ф + БМ + РА	4,2	–	23,2	–	26,2	–
	Ф + N ₄₅ + РА	–	13,9	–	41,5	–	46,6
	Ф + БМ+ N ₄₅ + РА	4,4	14,0	24,8	39,1	28,5	42,4
Мобилизация почвой ¹⁵ N удобрений	Ф + БМ	87,8	–	56,3	–	51,6	–
	Ф + N ₄₅	–	75,0	–	31,7	–	26,5
	Ф + БМ+ N ₄₅	87,2	76,2	53,3	37,0	46,9	32,5
	Ф + БМ + РА	87,5	–	56,6	–	52,8	–
	Ф + N ₄₅ + РА	–	75,2	–	32,8	–	26,9
	Ф + БМ+ N ₄₅ + РА	87,1	75,8	55,3	37,5	50,0	33,4

Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы

Неучтенные потери ¹⁵ N удобрений	Ф + БМ	8,0	–	22,8	–	24,9	–
	Ф + N ₄₅	–	11,0	–	31,0	–	32,3
	Ф + БМ+ N ₄₅	8,3	10,0	24,6	29,3	27,7	30,5
	Ф + БМ + РА	8,3	–	20,2	–	21,0	–
	Ф + N ₄₅ + РА	–	10,9	–	25,7	–	26,5
	Ф + БМ+ N ₄₅ + РА	8,5	10,2	19,9	23,4	21,5	24,2

Примечание: Ф – фон P₆₀K₆₀; БМ – биомасса горчицы белой; N₄₅ – аммиачная селитра в дозе 45 кг/га по д.в.; РА – Ризоагрин; N_A – аммиачная селитра.

Вынос, иммобилизация и потери из удобрений рассчитаны в % от дозы (БМ – 12,6 г/м², N_A – 4,6 г/м²); вынос из почвы в % от общего выноса фитомассой яровой пшеницы.

Инокуляция семян Ризоагрином в начале вегетации пшеницы не влияет на процессы как использования азота удобрений растениями, так и на его трансформацию в почве. Это обусловлено развитием сельскохозяйственных растений (активность азотфиксации нарастает параллельно росту культурного растения) (Умаров, 1986; 2009; Шабаев, 2004; Шотт, 2007).

Таблица 8.5

Динамика и структура использования яровой пшеницей азота удобрений и почвы, (средние за 3 года), % от выноса

Показатель	Вариант	Фаза вегетации растений					
		кущение		цветение		полная спелость	
		БМ	N _A	БМ	N _A	БМ	N _A
Вынос ¹⁵ N удобрений	Ф + БМ	14,6		30,6		31,1	
	Ф + N ₄₅	18,4		21,4		21,6	
	Ф + БМ+ N ₄₅	23,9		38,2		39,6	
	Ф + БМ + РА	13,2		28,6		29,5	
	Ф + N ₄₅ + РА	16,3		20,9		21,3	
	Ф + БМ+ N ₄₅ + РА	21,8		38,4		40,1	
Вынос ¹⁴ N почвы	Ф + БМ	85,4		69,4		68,9	
	Ф + N ₄₅	81,6		78,6		78,4	
	Ф + БМ+ N ₄₅	76,1		61,8		60,4	
	Ф + БМ + РА	86,8		71,4		70,5	
	Ф + N ₄₅ + РА	83,7		79,1		78,7	
	Ф + БМ+ N ₄₅ + РА	78,2		61,6		59,9	

Примечание: Ф – фон P₆₀K₆₀; БМ – биомасса горчицы белой; N₄₅ – аммиачная селитра в дозе 45 кг/га по д.в.; РА – Ризоагрин; N_A – аммиачная селитра.

В фазу цветения яровой пшеницы количество азота удобрения, использованного растениями, возрастало до 37% в варианте N₄₅ и 21% при внесении горчицы. Количество мобилизованного азота аммиачной селитры по сравнению с началом вегетации снижалось более чем в 2 раза, до 32% от внесенного, что обусловлено процессами минерализации – иммобилизации в почве. Мобилизованный в начале вегетации растений в виде массы микроорганизмов азот аммиачной селитры является основным источником активного азота, участвующего в краткосрочном внутрипочвенном круговороте. Азот, ассимилированный микроорганизмами, подвергается реминерализации после отмирания их биомассы и потребляется растениями постепенно или повторно включается в биомассу новых поколений микроорганизмов (Завалин, Соколов, 2016). Количество иммобилизованного

азота биомассы горчицы белой к фазе цветения пшеницы уменьшилось в 1,6 раза и составило 53%, что свидетельствует о постепенной минерализации органического удобрения. При этом уменьшалась доля азота почвы (в варианте с аммиачной селитрой до 79%, с биомассой горчицы – до 69%) и увеличивались его неучтенные потери: аммиачной селитры – до 31%, зеленого удобрения горчицы – до 23%. После фазы цветения у яровой пшеницы доля почвенного азота в выносе уменьшается несущественно и незначительно растет использование азота удобрения.

Положительное действие инокуляции Ризоагрином семян яровой пшеницы проявляется с развитием растений в онтогенезе. В фазу цветения увеличивается использование азота удобрений (из аммиачной селитры – на 6–7%, из горчицы – на 3%). Из данных таблицы 7.3.1 видно, что в динамике развития яровой пшеницы происходит увеличение потерь азота удобрений. Однако потери при инокуляции семян Ризоагрином меньше, чем без нее. Это обусловлено тем, что при применении биопрепаратов ассоциативных азотфиксаторов увеличивается использование растениями и иммобилизация азота биомассы горчицы.

Потоки азота удобрений и почвы. Почва – саморегулирующая система, которой присуще стремление к гомеостазу и определенному динамическому равновесию содержания азота, поэтому естественной ее реакцией на внесение удобрений является активизация процессов внутрипочвенного цикла трансформации данного элемента, в том числе его минерализации и иммобилизации (Осипов, Соколов, 2001).

Одним из важных показателей, характеризующих собственно агроэкосистему, управление ее развитием, а также оценивающих современные системы земледелия является «устойчивость». Данное свойство агроэкосистемы определяется не только структурными изменениями, происходящими в ней, но возможностью управления ими. Сложность управления потоками веществ в значительной степени связано с почвенно-климатическими условиями (тип почвы, метеорологические условия). Наиболее остро проблема управления круговоротом азота стоит в агроценозах на дерново-подзолистых почвах, которые не только подвержены водной эрозии вследствие низкого содержания гумуса, фульватного его типа; высокой миграции азота по склону; значительные потери азота как в процессе эрозии почвы при промывном типе водного режима, так и в результате денитрификации – нитрификации; высокая степень минерализации почвенного азота и низкая степень иммобилизации азота удобрений (Сычев, Соколов и др., 2012; Соколов, Завалин, Шмырева и др., 2015). Все вышесказанное уменьшает долю участия азота в продукционном процессе выращиваемых сельскохозяйственных культур, что в итоге отражается на их продуктивности и ведет к снижению качества продукции.

Использование изотопа ^{15}N при изучении агроэкосистем на разных по уровню применения агрохимикатов вариантах позволило выявить особенности формирования потоков азота удобрений и почвы (табл. 8.6). В процессе вегетации наибольшее количество почвенного азота минерализовалось при внесении биомассы горчицы ($29,9 \text{ г/м}^2$), при этом наиболее активно протекал процесс реиммобилизации азота ($14,9 \text{ г/м}^2$), что снижало нетто-минерализацию. Наибольшее количество нетто-минерализованного азота накапливалось

в почве при совместном внесении растительной массы горчицы и минерального удобрения (16,1 г/м²), что связано с увеличением потребления растениями азота почвы и удобрения, а также увеличением потерь азота вследствие усиления минерализации органической массы горчицы.

Минерализация почвенного азота и реиммобилизация азота при внесении аммиачной селитры в среднем за годы опыта уступала варианту с применением биомассы горчицы и составила соответственно 17,8 г/м² и 4,4 г/м², что связано с невысокой дозой внесенного азота минерального удобрения.

Инокуляция семян Ризоагрином на процессы минерализации и реиммобилизации существенного влияния не оказывала, отмечена некоторая положительная тенденция к росту показателей минерализации (+2...9%), нетто-минерализации (+2...7%) и реиммобилизации (+5...10%).

Таблица 8.6

Потоки азота удобрений, меченных ¹⁵N, и почвы в посевах яровой пшеницы при инокуляции биопрепаратом Ризоагрин (средние за 2014–2016 гг.)

Показатель	Ф + Биомасса горчицы (БМ)		Ф + N ₄₅		Ф + БМ + N ₄₅	
	Без инокуляции	Инокуляция	Без инокуляции	Инокуляция	Без инокуляции	Инокуляция
Минерализованный азот, г/м ²	30,2	32,0	17,7	18,3	27,8	28,4
Нетто-минерализованный азот, г/м ²	15,1	15,8	13,3	13,5	16,4	16,3
Реиммобилизованный азот, г/м ²	15,1	16,2	4,4	4,8	11,4	12,1

Примечание: Ф – фон P₆₀K₆₀, N₄₅ – аммиачная селитра.

Существенное влияние на вышеуказанные потоки азота (минерализацию и иммобилизацию азота почвы и удобрений) оказывали погодные условия, которые неодинаково влияли на процессы трансформации азота применяемых удобрений. Наибольшее значение минерализации почвенного азота с внесением растительной массы горчицы отмечено в 2015 и 2016 гг. и составило соответственно 31,6 и 32,5 г/м². Это, по-видимому, связано с запасами влаги в почве и оптимальными температурными значениями в мае месяце (содержание продуктивной влаги в слое 0–40 см в 2015 г. составило 61,2 мм, в 2016 г. – 73,1 мм), которые способствовали увеличению микробиологической активности и, как следствие, усилению процессов минерализации и иммобилизации растительной массы горчицы. В эти же годы отмечено и наибольшее накопление реиммобилизованного азота.

Несколько иные данные получены при внесении минеральных удобрений. При оптимальных метеорологических условиях 2014 г. (ГТК=1,33) наблюдалось наибольшее значение минерализации почвенного азота в варианте с аммиачной селитрой, что связано как с увеличением использования азота удобрения растениями яровой пшеницы, так и с микробиологической его иммобилизацией. Стрессовые погодные условия вегетации снижают потребление

ние растениями азота минерального удобрения и увеличивают его потери.

При совместном применении биомассы горчицы и аммиачной селитры потоки азота почвы приближены к варианту РК+биомасса горчицы, что обусловлено более высокой дозой азота в органической форме, в то время как доза азота минерального удобрения не превышала физиологического значения для яровой пшеницы. Однако есть и различия. Минеральные удобрения усиливают микробиологическую минерализацию растительной массы горчицы, что приводит к усилению использования азота почвы и росту потерь. Как следствие, в варианте РК+ БМ+N₄₅ по сравнению с РК+ БМ усиливается нетто-минерализация в среднем на 9% с колебаниями, определяемыми метеорологическими условиями от 7 до 12%. Изменяется и процесс реиммобилизации – внесение минеральных удобрений на фоне растительной массы существенно его уменьшает в среднем на 24%. Наиболее сильно это проявляется в засушливые (30%) и переувлажненные годы (27%). При ГТК=1,33 (2014 г.) минимальное снижение количества реиммобилизованного азота – 13%.

Проведенный расчет интегральной оценки функционирования системы агрофитоценоза яровой пшеницы (табл. 8.7) выявил существенные различия в процессах трансформации азота в агроэкосистеме. Несмотря на сравнительно одинаковую активность минерализации азота в агроэкосистемах на вариантах фон + Биомасса горчицы и фон + Биомасса горчицы (БМ) +N₄₅ (30,2 и 27,8 г/м²), поток Н-М азота в дерново-подзолистой почве при внесении органических и минеральных удобрений отмечен в относительном выражении намного больше, чем поток РИ (59% против 41% от М). Применение одной растительной массы горчицы привело к тому, что потоки азота РИ и Н-М оказались одинаковыми. В результате соотношение Н-М : РИ различалось в вариантах Ф+БМ и Ф+БМ+N₄₅ (соответственно 1,0 и 1,4).

Таблица 8.7

Показатели интегральной оценки функционирования системы почва-растение при выращивании яровой пшеницы в зависимости от вида удобрения, меченного ¹⁵N, и биопрепарата Ризоагрин

Показатель	Ф + Биомасса горчицы (БМ)		Ф + N ₄₅		Ф +БМ + N ₄₅	
	Без инокуляции	Инокуляция	Без инокуляции	Инокуляция	Без инокуляции	Инокуляция
условия увлажнения – достаточные (ГТК=1,33), 2014 г.						
РИ : М, %	49	50	30	31	43	45
Н – М : РИ	1,0	1,0	2,3	2,2	1,3	1,2
условия увлажнения – засушливые (ГТК=0,64), 2015 г.						
РИ : М, %	57	58	29	29	46	48
Н – М : РИ	0,8	0,7	2,4	2,5	1,2	1,1
условия увлажнения – повышенные (ГТК=1,63), 2016 г.						
РИ : М, %	44	45	15	15	35	36
Н – М : РИ	1,3	1,2	5,8	5,8	1,9	1,8
средние за три года						
РИ : М, %	50	51	25	25	41	43
Н – М : РИ	1,0	1,0	3,1	3,0	1,4	1,3

Примечание: Ф – фон P₆₀K₆₀, N₄₅ – аммиачная селитра.

Согласно шкале интегральной оценки, функционирование агроэкосистемы в варианте с внесением биомассы горчицы соответствовало режиму гомеостаза, а уровень воздействия (нагрузка) оказался в норме. При совместном использовании биомассы горчицы и аммиачной селитры функционирование агроэкосистемы соответствовало режиму стресса, а уровень воздействия (нагрузка) опустился до допустимого.

Иная ситуация складывалась при применении минеральных азотных удобрений. В среднем за годы проведения опыта минерализация оказалась значительно ниже вариантов с внесением биомассы горчицы – в 1,7 раза, что связано с дозой внесения азота. Функционирование агроэкосистемы в варианте с аммиачной селитрой показало слабую устойчивость к антропогенному воздействию и соответствовало режиму резистентности (РИ : М около 30%), переходящему в отдельные годы к адаптационному истощению (РИ : М = 15%), а уровень воздействия (нагрузка) – предельно допустимый; при повышенном увлажнении – критический (рис. 7), по показателю Н-М : РИ – недопустимый.

Применение биологического препарата на основе ассоциативных diaзотрофов существенного воздействия на устойчивость агроэкосистемы дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы не оказало, только отмечена незначительная тенденция повышения его устойчивости при внесении биомассы горчицы за счет роста РИ.

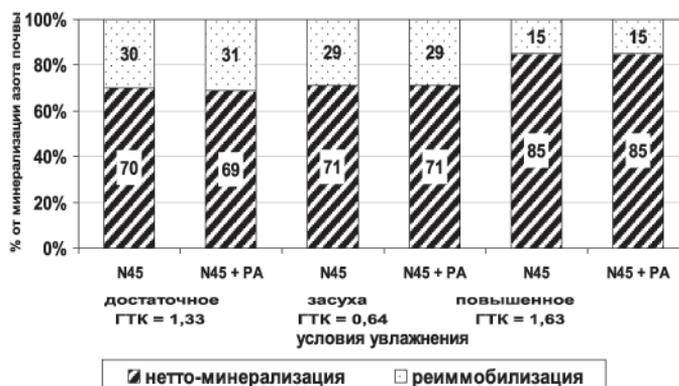


Рис. 7. Потоки азота (нетто-минерализация и реиммобилизация) в вариантах N₄₅ и N₄₅ + Ризоагрин (N₄₅ + PA)

В большей степени на устойчивость агроценоза при использовании видов удобрений оказывали метеорологические условия выращивания яровой пшеницы (табл. 8.7 и рис. 7–9). В первую очередь те, которые влияют на иммобилизацию и потери азота удобрений и почвы. Погодные условия 2014 и 2015 гг. снижали потери азота вследствие отсутствия промывного водного режима на легкой по гранулометрическому составу почве. Оптимальное соотношение температуры и влажности почвы также увеличивало иммобилизацию азота, особенно биомассы горчицы (в 2015 году достаточные запасы влаги в почве и температура воздуха, близкая к среднеголетней, в мае способствовали усилению иммобилизации).

В 2016 г. погодные условия способствовали увеличению потерь азота вследствие снижения использования яровой пшеницей его из удобрений и закрепления в почве.

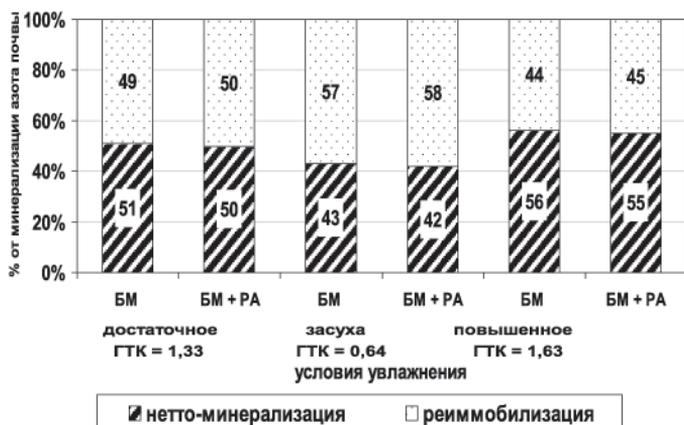


Рис. 8. Потоки азота (нетто-минерализация и реиммобилизация) в вариантах Биомасса (БМ) и Биомасса+ Ризоагрин (БМ+РА)

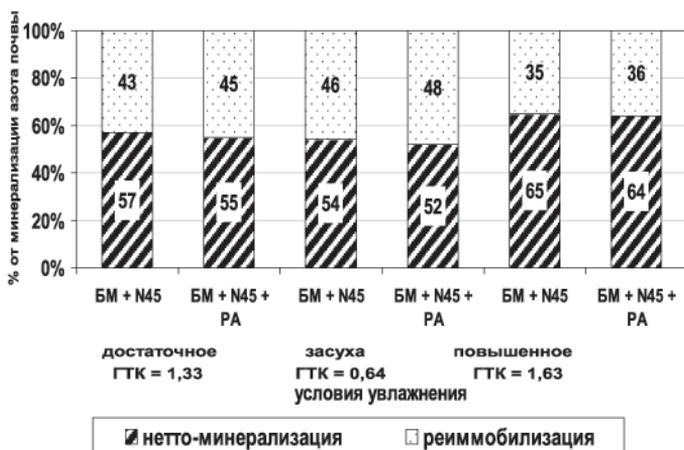


Рис. 9. Потоки азота (нетто-минерализация и реиммобилизация) в вариантах Биомасса+N₄₅ (БМ+N₄₅) и Биомасса+N₄₅+ Ризоагрин (БМ+N₄₅+РА)

При применении биомассы горчицы под яровую пшеницу наблюдалась смена режимов функционирования в зависимости от погодных условий – стресс - гомеостаз. Даже повышенные условия увлажнения (при 1,5 объеме выпадения осадков к среднемуголетней норме) существенно не изменили устойчивость агроэкосистемы, что указывает на ее способность при внесении сидерата горчицы проявлять «резистентную устойчивость» (РИ : М = 44–57%) (рис. 8). Это свидетельствует, что уровень антропогенной нагрузки находится в норме.

Такая же ситуация наблюдалась в варианте применения биомассы горчицы с аммиачной селитрой (рис. 9): РИ : М = 35–46%, Н-М : РИ = 1,2–1,9. При засухе или достаточном увлажнении агроэкосистема находилась в состоянии гомеостаза, а при повышенном увлажнении переходила в режим функционирования – стресс (допустимый уровень воздействия).

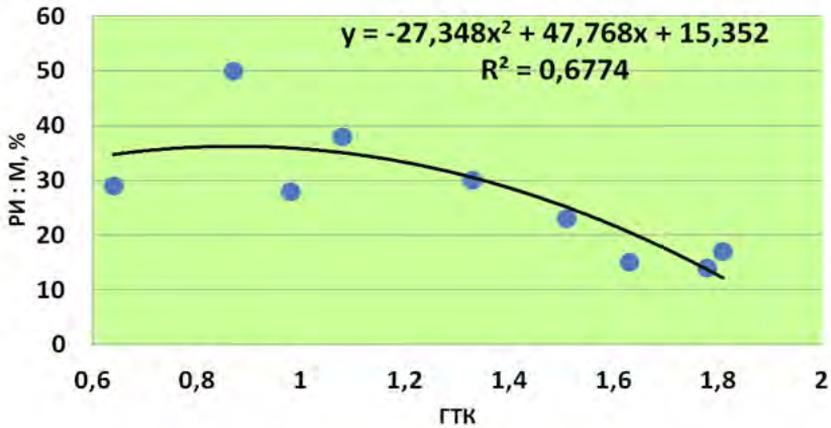
Отмеченное при расчетах показателей устойчивости агроэкосистемы влияние погодных условий выявило необходимость определения вышеуказанных показателей (РИ : М) в меняющихся метеорологических условиях. Для расчетов использовали данные микрополевых опытов с яровой пшеницей, проведенных А.А. Алферовым и Л.С. Черновой в Смоленской и Московской областях на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах (период 1995–1999 и 2014–2016 гг.).

Устойчивость агроэкосистемы или ее способность сохранять структуру и функции (показатель РИ : М, %) в изменяющихся метеорологических условиях при внесении азотного удобрения была выше в оптимальных температурных и влажностных условиях (ГТК =1,0). Как засушливые, так и влажные погодные условия снижают устойчивость агроэкосистемы, что подтверждается уравнением регрессии – сильной по тесноте и криволинейной по форме (рис. 10а):

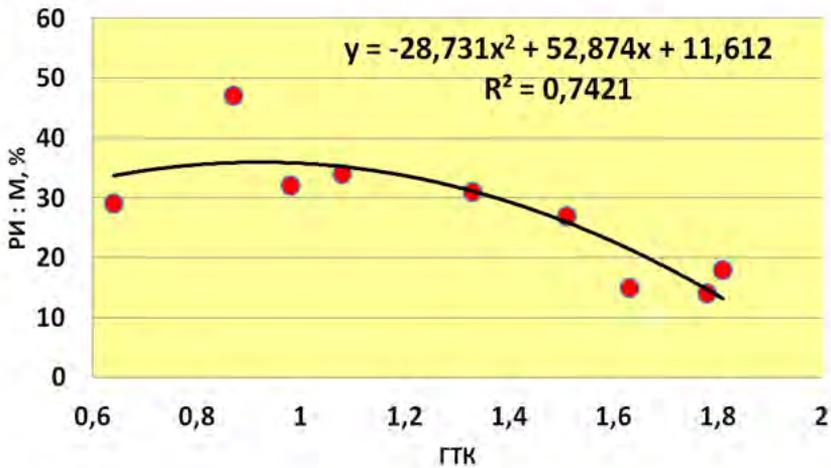
$$Y = -27,348x^2 + 47,768x + 15,352, \eta_{yx} = 0,82, \quad (17)$$

где Y – отношение реиммобилизованного азота к количеству минерализованного, %; x – ГТК за вегетацию; η_{yx} – коэффициент множественной корреляции; n = 9, $t_1 > t_r$.

Надо полагать, реакция агроэкосистемы на погодные условия обусловлена когерентным взаимодействием всех компонентов (обменные процессы, прямые и обратные связи). В первую очередь погодные условия влияют на интенсивность (ре)иммобилизации азота и его рециркуляцию во внутривершинном цикле («возврат» на выходе), что является важным условием поддержания динамического равновесия в агроэкосистеме. Системный анализ трансформации почвенного азота (уравнение регрессии) выявил, что режим функционирования агроэкосистемы зависит от сбалансированности потоков нетто-минерализованного и (ре)иммобилизованного азота. При значительном выпадении осадков сбалансированность потоков нетто-минерализованного и (ре)иммобилизованного азота изменяется в сторону снижения интенсивности иммобилизации азота. Уже при ГТК $\geq 1,3$ агроэкосистема переходит в режим функционирования, обозначаемый как «резистентность» (уровень воздействия – предельно допустимый), а при ГТК $\geq 1,65$ испытывает адаптационное истощение. При избыточном увлажнении (ГТК $\geq 1,8 \dots 2,0$) внесенное азотное удобрение переводит агроэкосистему в режим репрессии, что приводит к снижению степени участия азота минерального удобрения в продукционном процессе яровой пшеницы. В нашем опыте (см. главу 3) в 2016 г. при ГТК = 1,68 прибавка от применения 45 кг д.в. /га азотного удобрения составила 1,59 г/сосуд, что значительно меньше, чем в 2015 и 2014 гг.



(a)



(b)

Рис. 10. Изменение режима функционирования агроэкосистемы в посевах яровой пшеницы от метеорологических условий вегетации (ГТК) (а – вариант N₄₅, б – вариант N₄₅ + Ризоагрин)

При инокуляции семян яровой пшеницы Ризоагрином на фоне применения азотного удобрения наблюдаемое состояние функционирования агроэкосистемы почти не отличается от варианта применения только азотного удобрения. Как засушливые, так и влажные погодные условия снижают устойчивость агроэкосистемы, что подтверждается уравнением регрессии – сильной по тесноте и криволинейной по форме (рис. 10б):

$$Y = -28,731x^2 + 52,874x + 11,612, \eta_{yx} = 0,86, \quad (18)$$

где Y – отношение реимобилизованного азота к количеству

минерализованного, %; x – ГТК за вегетацию; η_{yx} – коэффициент множественной корреляции; $n = 9$, $t_1 > t_r$.

Таким образом, инокуляция семян яровой пшеницы Ризоагрином не оказывает существенного влияния на устойчивость функционирования агроэкосистемы.

Потоки азота удобрений при применении препаратов эндофитных бактерий. Ранее было отмечено о повышении урожайности зерна яровой пшеницы при инокуляции семян биопрепаратами эндофитных бактерий на фоне применения РК-удобрений и НРК-удобрений. Возникает законный вопрос: за счет чего это происходит, механизмы действия штаммов эндофитных бактерий на культурные растения. В этой связи представляет интерес такой критерий, характеризующий режим азотного питания растений как коэффициент использования азота удобрения (КИ). В проведенном опыте при подсчете КИ, проведенного разностным методом (табл. 8.8), отмечено увеличение потребления азота удобрений при инокуляции семян биопрепаратами эндофитных штаммов БП1 (штамм *Bacillus megasterium* V3) и БП2 (штамм *Bacillus subtilis* V4). Рост составляет 24–37%, что значительно больше, чем применение стандартного препарата Экстрасол. КИ азота удобрения, полученные в опыте разностным методом, составили 89–137%, т.е. в большинстве вариантов $>100\%$. Это связано с тем, что происходит потребление растениями не только азота удобрений, но и «экстра»-азота, образующегося в результате минерализации почвенных запасов при внесении аммиачной селитры (Кореньков, 1999; Завалин, Алметов, Чернова, 2014), а также ассоциативного азота, фиксированного в результате применения биопрепарата БП1 (Чеботарь, Заплаткин, Щербаков и др., 2016).

Определенный разностным методом коэффициент использования азота удобрений дает надежное представление об интенсивности поглощения азота растениями и эффективности применяемых удобрений, но не отражает истинной величины использования азота удобрений (Завалин, Соколов, 2016). В этой связи для расчета баланса и слагаемых круговорота азота в системе удобрение – почва – растение пригоден изотопный анализ. Расчет КИ, проведенный с применением изотопа ^{15}N , показывает, что применение на яровой пшенице эндофитных препаратов и Экстрасола повышает использование азота минерального удобрения на 7,5–11,7%. По мнению ряда ученых (Чеботарь, Макарова, Шапошников и др., 2009; Чеботарь, Заплаткин, Щербаков и др., 2016; Malfanova, Kamilova, Validov et al., 2011), штаммы эндофитных бактерий способны продуцировать ряд фитогормонов, которые стимулируют развитие корневой системы растений, особенно корневых волосков, что способствует существенному улучшению поглотительной способности и приводит к увеличению использования ими азота применяемых минеральных удобрений.

Таблица 8.8

Использование яровой пшеницей азота почвы и удобрений
(микрочаевой опыт, средние за 2 года)

Варианты опыта	Коэффициент использования азота удобрений (КИ), %	
	изотопным методом	разностным методом
Ф + N ₄₅	45,7	102,2
Ф + N ₄₅ + Экстрасол (стандарт)	54,3	89,4
Ф + N ₄₅ + БП1	53,2	123,9
Ф + N ₄₅ + БП2	57,4	137,2

Примечание: P₃₀K₄₅ – фон (Ф).

Эффективность применяемых средств химизации и биологизации определяется как прямым действием внесенного азота (непосредственный источник азотного питания растений), так и косвенным, проявляющимся в дополнительной минерализации азота почвы под воздействием удобрений – «экстра»-азот (Руделев, 1993; Кореньков, 1999; Трепачев, 1999). Определение концентрации общего азота в зерне и соломе позволило рассчитать его накопление, а изотопный анализ азота – установить его источники, участвующие в формировании урожая яровой пшеницы, возделываемой на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве. На РК-фоне урожай яровой пшеницы (масса зерна + масса соломы) формировался только за счет почвенного азота (табл. 8.9). Инокуляция семян биопрепаратами Экстрасол, БП1 и БП2 способствует росту потребления азота почвы по сравнению с Ф1 на 10,7–20,4%. Наибольший вынос азота отмечается при применении БП1, что обусловлено способностью микроорганизмов, входящих в его состав, к азотфиксации.

Таблица 8.9

Потребление азота яровой пшеницей при применении NH₄NO₃
и инокуляции семян биопрепаратами эндофитных бактерий (средние за два года)

Вариант	Общий вынос N, г/м ²	N удобрения		N почвы, г/м ²	
		г/м ²	% от внесенного	всего	«экстра»-азот
1. P ₃₀ K ₄₅ –фон (Ф1)	9,3	–	–	9,3	–
2. Ф1 + Экстрасол (стандарт)	10,3	–	–	10,3	–
3. Ф1 + БП1	11,2	–	–	11,2	–
4. Ф1 + БП2	10,3	–	–	10,3	–
5. N ₄₅ P ₃₀ K ₄₅ (Ф2)	13,9	2,1	45,7	11,8	2,5
6. Ф2 + Экстрасол	13,4	2,4	54,3	11,0	0,7
7. Ф2 + БП1	14,9	2,4	53,2	12,5	1,3
8. Ф2 + БП2	15,5	2,6	57,4	12,9	2,6

При внесении азотных удобрений усиливается минерализация почвенного органического вещества и поэтому возрастает доступность растениям азота почвы. К моменту уборки в вариантах с азотными удобрениями усвоение азота почвы оказалось почти в 1,5 раза больше, чем на контроле, при этом доля почвенного азота в выносе составила 85%. Расчетная доля «экстра»-азота по годам исследования варьировала

незначительно и в среднем составляла 18% от выноса. При совместном применении аммиачной селитры и биопрепаратов доля «экстра»-азота варьирует в пределах 5–17%. Снижение расчетной доли «экстра»-азота в варианте NPK+ БП1 обусловлено тем, что азотфиксирующий эндофит, входящий в состав биопрепарата, улучшает азотное питание растений пшеницы за счет фиксации атмосферного азота.

Необходимо отметить, что некоторое увеличение доли «экстра»-азота при совместном применении NPK+ БП2 обусловлено особенностями штамма эндофита, входящего в состав биопрепарата. *Bacillus subtilis* за счет более интенсивной колонизации культурных растений и продуцирования вторичных бактериальных метаболитов проявляет бактерицидную активность по отношению к фитопатогенам родов *Pseudomonas syringae* и *Erwinia*, а также фунгицидную активность по отношению к роду *Fusarium* (Чеботарь, Щербаков, Щербакова и др., 2015). Это способствует лучшему развитию корневой системы растений пшеницы и увеличению потребления азота как удобрения, так и почвы.

Баланс азота удобрения в среднем за два года исследований складывался следующим образом. Растениями яровой пшеницы использовалось около 46% азота аммиачной селитры (табл. 8.10). При совместном применении азотного удобрения и биопрепаратов эндофитных бактерий увеличивается использование N из аммиачной селитры до 53–57% N. В слое 0–20 см иммобилизовалось около 25% азота удобрений. Применение Экстрасола, БП1 и БП2 не оказывает существенного влияния на иммобилизацию азота аммиачной селитры. Более весомую роль в процессах иммобилизации азота удобрений играют гетеротрофные микроорганизмы, к которым вышеуказанные штаммы не относятся (Завалин, Соколов, 2016; Ассое et al., 2004).

Важной статьёй баланса азота являются потери. Потери азота из почвы в газообразной форме и при вымывании в нижележащие слои – основная причина снижения коэффициента использования азота растениями и эффективности удобрений. В нашем опыте при внесении азотного удобрения и применения биопрепаратов эндофитных бактерий неучтенные потери азота N₄₅ при вымывании в нижележащие слои почвы и газообразные потери (молекулярный азот, его окислы и аммиак) составили 17,5–21,4%, что на 7,5–11,6% меньше, чем в варианте без инокуляции семян. Снижение потерь обусловлено увеличением потребления азота азотного удобрения при инокуляции биопрепаратами. Необходимо отметить, что применение БП2 (содержит штамм *Bacillus subtilis*, продуцирующий бактериальные метаболиты, снижающие бактерицидную активность фитопатогенов) в условиях избыточного увлажнения более эффективно, чем других рассматриваемых биопрепаратов (Экстрасол и БП1), что, по-видимому, обусловлено развитием фитопатогенов. Потери N при инокуляции БП2 на 3,3% меньше, чем при применении Экстрасола, и на 3,9% меньше по сравнению с БП1.

Таблица 8.10

Баланс азота удобрения при выращивании яровой пшеницы, инокулированной биопрепаратами эндофитных бактерий (средние за два года)

Вариант	Доза N, г/м ²	Использовано растениями N	Закреплено в 20 см слое почвы	Потери из 20 см слоя почвы
Ф + N ₄₅	4,5	$\frac{2,1}{45,7}$	$\frac{1,1}{25,2}$	$\frac{1,2}{29,1}$
Ф + N ₄₅ + Экстрасол	4,5	$\frac{2,4}{54,3}$	$\frac{1,1}{24,9}$	$\frac{1,0}{20,8}$
Ф + N ₄₅ + БП1	4,5	$\frac{2,4}{53,2}$	$\frac{1,1}{25,4}$	$\frac{1,0}{21,4}$
Ф + N ₄₅ + БП2	4,5	$\frac{2,6}{57,4}$	$\frac{1,1}{25,1}$	$\frac{0,8}{17,5}$

Примечание: Фон – P₃₀K₄₅ (Ф) – контроль; числитель – г/м², знаменатель – % от внесенного с удобрением.

Биосферная функция почв в экосистемах связана с формированием биогеохимических циклов элементов, прежде всего азота и углерода. Изучение цикла азота особенно необходимо в агроэкосистемах, испытывающих постоянное антропогенное воздействие (Помазкина, Котова, Зорина и др., 2008). В этой связи изучение воздействия на агроэкосистему азотного удобрения при применении биопрепаратов эндофитных бактерий необходимо для оценки их влияния на биогеохимический цикл азота. По мнению Б.Н. Миркина, Ф.Х. Хазиева (1993), агроэкосистемы должны отвечать требованиям сестайнинга, к которым относятся формирование экологического равновесия за счет замкнутости циклов вещества (азота), минимализации количества антропогенной энергии, повышение биологического разнообразия с учетом кооперативных взаимодействий (цитируется по Помазкиной, Котовой, Зориной и др., 2008). Исследования показали влияние азотного удобрения и биопрепаратов эндофитных бактерий на трансформацию азота в агроэкосистеме (табл. 8.11). На экосистемном уровне изменения во внутрпочвенном цикле азота проявляются в формировании потоков нетто-минерализованного и реиммобилизованного азота и их соотношения (**Н–М : РИ**), показатели которого используются для оценки режима функционирования агроэкосистемы и антропогенной нагрузки.

Интенсивность трансформации азота в почве оценивали по величине минерализованного за вегетацию азота (**М**), формирующего потоки нетто-минерализованного и реиммобилизованного азота. На дерново-подзолистой среднесуглинистой почве показатель **М** азота при внесении N₄₅ составил 27,0 г/м², при совместном применении азотного удобрения и биопрепаратов 21,2–24,6 г/м². Несколько более высокие показатели **М** в варианте Ф + N₄₅, по-видимому, связаны с тем, что доля почвенного азота в общем выносе больше при внесении только азотного удобрения по сравнению с совместным его применением с биопрепаратами (86% и 82–83% соответственно). Во всех вариантах большую долю минерализованного азота составлял нетто-минерализованный азот (Н – М) – 75–77%. Абсолютные величины Н – М при применении N₄₅ и биопрепаратов меньше, чем при внесении только

азотного удобрения (16,2–18,6 против 20,5 г/м²), что обусловлено более низкими потерями азота удобрений и лучшим использованием его из аммиачной селитры при инокуляции семян биопрепаратами.

Таблица 8.11

Потоки азота удобрений, меченных ¹⁵N, почвы и показатели интегральной оценки функционирования системы почва-растение в посевах яровой пшеницы при инокуляции биопрепаратами эндوفитных бактерий (средние за два года)

Показатель	Ф + N ₄₅	Ф + N ₄₅ + Экстрасол	Ф + N ₄₅ +БП1	Ф + N ₄₅ +БП2
Минерализованный азот, г/м ² (М)	27,0	21,2	24,6	23,4
Нетто-минерализованный азот, г/м ² (Н – М)	20,5	16,2	18,6	17,8
Реиммобилизованный азот, г/м ² (РИ)	6,5	5,0	6,0	5,6
РИ : М, %	24	24	24	24
Н – М : РИ	3,1	3,2	3,1	3,1

Анализ состояния агроэкосистемы под яровой пшеницей при применении азотного удобрения показал, что она функционирует в режиме резистентности (уровень воздействия – предельно допустимый). Инокуляция семян биопрепаратами эндوفитных бактерий не повышает устойчивость агроэкосистемы, что обусловлено отсутствием роста иммобилизации азота удобрений (показатель **РИ : М**, во всех вариантах находился на уровне 24%).

Таким образом, использование яровой пшеницей внесенного в дерново-подзолистую легкосуглинистую почву меченного ¹⁵N азота растительной массы горчицы белой усиливается при оптимальных значениях ГТК. Меченый азот биомассы горчицы белой сразу же вовлекается во внутрипочвенный минерализационно-иммобилизационный цикл азота, ускоряет его оборачиваемость, при этом часть внесенного в почву азота удобрения теряется.

Разложение растительной массы горчицы белой в почве происходит наиболее интенсивно при достаточном выпадении осадков. Высвобождающийся азот не накапливается в почве в минеральной форме, поскольку подвергается иммобилизации, использованию растениями и потере в ходе нитрификации и последующей денитрификации.

Коэффициент использования (КИ) яровой пшеницей меченного ¹⁵N воздушно-сухой надземной горчицы белой с соотношением С : N соответственно 20–25:1 при ГТК=1,3 составили 36% от внесенного, при ГТК=0,64 и 1,63 – 15–18%, а рассчитанные разностным методом соответственно 43%, 19 и 26%. Внесение растительной массы горчицы усиливает мобилизацию и потребление растениями почвенного азота (по отношению к фону РК в среднем на 16%).

Коэффициент использования (КИ) яровой пшеницей меченного ¹⁵N аммиачной селитры составил 35–49% от внесенного количества.

При совместном внесении биомассы горчицы с азотным удобрением КИ яровой пшеницей меченого азота горчицы возрастал до 17–39%

в зависимости от погодных условий, но оставался значительно ниже рассчитанного разностным методом КИ. Добавление растительной массы горчицы к дозе N_{45} снижало КИ яровой пшеницы меченого азота удобрения до 31–44% от внесенного количества.

Инокуляция Ризоагрином усиливала потребление растениями азота аммиачной селитры на 5–9% в зависимости от погодных условий, биомассы горчицы – только положительная тенденция. Применение биопрепаратов эндофитных бактерий увеличивает использование азота минерального удобрения на 8–12%.

Абсолютные размеры иммобилизации в структуре баланса меченого азота минерального удобрения составляли 16–32% от внесенного количества и повышались в составе совместно применявшихся источников минерального и органического азота до 18–38%. Инокуляция как Ризоагрином, так и биопрепаратами эндофитных бактерий не оказывает влияния на иммобилизацию азота минерального удобрения.

Газообразные потери меченого азота минерального удобрения составляли 19–50% от внесенного по фону РК в зависимости от погодных условий и снижались (до 10–40%) при сочетании органического и минерального азота и инокуляции Ризоагрином. Потери меченого азота растительной массы горчицы в зависимости от метеорологических условий вегетации составили 17–37% от внесенного без добавления минерального азота по фону РК и уменьшались при инокуляции Ризоагрином до 9–33%.

Динамика баланса азота у растений пшеницы в онтогенезе при использовании Ризоагрина оказалась такой же, как при внесении азотного удобрения и биомассы горчицы. В фазу кущения растения слабо использовали азот удобрений (до 14% азота из аммиачной селитры и только 4,2–4,5% из сидерата горчицы), он в основном иммобилизовался, его потери также незначительны (8–11%). Основное использование азота удобрений происходило к фазе цветения (из аммиачной селитры – 37–44%, биомассы горчицы – 22–25%).

Системный анализ трансформации почвенного азота выявил, что режим функционирования агроэкосистемы при применении агрохимикатов и Ризоагрина зависел от сбалансированности потоков нетто-минерализованного и (ре)иммобилизованного азота. Использование интегральной оценки показало, что на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве агроэкосистема функционировала: в режиме гомеостаза при применении биомассы горчицы белой (БМ), в режиме стресса при совместном использовании БМ и минерального азотного удобрения и в режиме резистентности при применении одной аммиачной селитры. На дерново-подзолистой среднесуглинистой почве агроэкосистема функционировала в режиме резистентности при применении только азотного удобрения. Существенных различий по показателю функционирования агроэкосистем между вариантами с инокуляцией яровой пшеницы Ризоагрином, Экстрасолом, БП1 и БП2 и без них не установлено. Вместе с тем применение Ризоагрина способствует относительному усилению нетто-минерализации (в среднем на 5%) и иммобилизации (в среднем на 6%) растительной массы горчицы, используемой в качестве сидерата.

Особенно это заметно при метеорологических условиях, приближенных к среднемноголетнему значению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность применения биопрепаратов ассоциативных diaзотрофов в посевах яровых зерновых культур определяется типом почв. Применение Ризоагрина и Флавобактерина способствует получению средневзвешенной прибавки урожайности зерна яровой пшеницы на черноземах до 23%, серых лесных – до 14%, дерново-подзолистых почвах – на 13–18%.

Коэффициент использования азота минеральных удобрений яровой пшеницей при инокуляции семян биопрепаратами возрастает на дерново-подзолистых почвах с 36–50% до 39–60%, серых лесных почвах – с 29 до 31% и черноземах – с 28 до 46%; у ячменя соответственно с 39–49% до 46–58%, с 39 до 52%, с 31 до 36%. Инокуляция семян биопрепаратами способствует повышению окупаемости азота минерального удобрения в посевах яровой пшеницы: на черноземах в 2,3 раза, на дерново-подзолистых почвах – в 1,5–2,1, на серых лесных – в 2,1 раза; ячменя – соответственно в 2,4, 1,6–2,0 и в 1,8 раза.

На дерново-подзолистых почвах со средним содержанием гумуса ведущая роль в повышении урожайности зерна яровой пшеницы принадлежит сидерату (биомасса горчицы белой) и минеральным удобрениям, прибавка от применения N_{45} составляет не менее 42%, сидерата – 58%, совместном их внесении – 99%. Прибавка от ризосферных биопрепаратов (Ризоагрин) составляет 8–19%, от биопрепаратов на основе эндофитных микроорганизмов – 25–33%.

Формирование биомассы яровой пшеницы на дерново-подзолистой почве осуществляется в основном за счет почвенного азота, доля которого достигает 4/5 общего выноса элемента при применении минеральных удобрений и 3/4 при внесении биомассы горчицы. Вклад азота сидерата в формирование урожая яровой пшеницы определяется гидротермическими условиями: при благоприятных – возрастает, в засушливых условиях и при повышенном увлажнении – снижается на 5–8%. Доля участия «экстра»-азота в продукционном процессе ограничена (14% от общего выноса при внесении азотного удобрения отдельно и в сочетании с применением биомассы горчицы).

Дополнительное использование азота яровой пшеницей на дерново-подзолистой почве за счет инокуляции семян биопрепаратом Ризоагрин составляет 8–13 кг/га и изменяется с учетом метеорологических условий от 2 до 21 кг/га (минимум – в засушливых условиях и максимум – при достаточном увлажнении).

Азот минеральных удобрений и сидерата в почве включается в циклические минерализационно-ремобилизационные превращения. Высокая иммобилизация азота удобрений в дерново-подзолистой почве является ключевым процессом, который обуславливает устойчивость агроэкосистемы. Абсолютные размеры иммобилизации в структуре баланса меченого азота минерального удобрения составляют 16–32% от внесенного количества и

повышаются при применении сидерата до 18–38%. При внесении биомассы горчицы размеры иммобилизации в структуре баланса составляют $52 \pm 7\%$. Инокуляция биопрепаратами как ризосферных diaзотрофов (Ризоагрин), так и эндофитных микроорганизмов не влияет на иммобилизацию азота минерального удобрения; на иммобилизацию азота биомассы горчицы отмечена только положительная тенденция.

Неучтенные потери меченого азота минерального удобрения составляют 19–50% от внесенного в зависимости от погодных условий и снижаются на 6–9% (до 10–40%) при сочетании органического и минерального удобрений и инокуляции семян Ризоагрином. Потери меченого азота сидерата в различных метеорологических условиях вегетации составляют 17–37% от внесенного количества. Инокуляция семян Ризоагрином увеличивает потребление азота N-удобрений и обеспечивает положительную тенденцию в закреплении в почве азота сидерата и снижает его потери на 4–6%.

Режим функционирования агроэкосистемы при применении азотного удобрения, сидерата и Ризоагрина зависит от сбалансированности потоков нетто-минерализованного и (ре)иммобилизованного азота в почве. На дерново-подзолистой легкосуглинистой почве агроэкосистема функционирует: в режиме гомеостаза (норма) при применении сидерата (биомасса горчицы белой (БМ), в режиме стресса (допустимый) при совместном использовании БМ и минерального азотного удобрения. При применении аммиачной селитры агроэкосистема менее устойчива, функционирует в режиме резистентности (предельно допустимый), в годы с повышенным увлажнением переходит в зону репрессии (недопустимый). При применении только азотного удобрения на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве агроэкосистема функционирует в режиме резистентности.

Функционирование агроэкосистемы при внесении азотного удобрения существенно варьирует при изменении метеорологических условий в период вегетации: в засушливых и влажных погодных условиях ее устойчивость снижается, что подтверждается уравнением регрессии – сильной по тесноте и криволинейной по форме ($\eta_{yx} = 0,82$, $t_{\eta} > t_r$).

Существенных различий по показателю функционирования агроэкосистем между вариантами с инокуляцией яровой пшеницы различными биопрепаратами (Ризоагрин, Экстрасол, БП1 и БП2) и без них не установлено. Применение Ризоагрина способствует относительному усилению нетто-минерализации (в среднем на 5%) и иммобилизации (в среднем на 6%) азота растительной массы горчицы при метеорологических условиях, близких к среднесуточному значению.

На основе данных содержания гумуса и величины рН разработаны модели прогноза эффективности применения биопрепаратов ассоциативных diaзотрофов, которые позволяют определить величину урожайности зерна яровых зерновых культур (пшеницы и ячменя) на разных уровнях азотного питания на дерново-подзолистых почвах при варьировании метеорологических условий вегетационного периода.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авдонин, Н.С.* Свойства почвы и урожай / Н.С. Авдонин. – Москва: Колос, 1965. – 271 с.
2. *Авилов, А.С.* Трансформация азота биомассы горчицы белой / А.С. Авиллов, О.А. Соколов, А.А. Завалин, Н.Я. Шмырева // Достижения науки и техники АПК. – 2016. – Т. 30. – № 2. – С. 29–31.
3. *Алметов, Н.С.* Зависимость величины и качества урожайности яровой пшеницы при использовании биопрепаратов / Н.С. Алметов, В.В. Бердников // Бюллетень ВИУА. – 1999. – № 112. – С. 55–57.
4. *Алметов, Н.С.* Эффективность использования ассоциативных азотфиксирующих биопрепаратов на посевах зерновых культур / Н.С. Алметов, В.В. Бердников, Е.Г. Волков, П.Н. Семенов // Бюллетень ВИУА. – 2001. – № 114. – С. 56.
5. *Алметов, Н.С.* Продуктивность ячменя при использовании минеральных удобрений на дерново-слабоподзолистых почвах / Н.С. Алметов, Л.С. Чернова, А.А. Завалин // Плодородие. – 2012. – № 3. – С. 2–4.
6. *Алметов, Н.С.* Эффективность применения минеральных удобрений и биопрепарата Флавобактерин на яровой пшенице / Н.С. Алметов, Н.В. Горячкин, Х.З. Назмиев, Л.Н. Самойлов, А.А. Завалин // Плодородие. – 2012 – №5. – С. 34–36.
7. *Алметов, Н.С.* Урожайность и качество зерна яровой пшеницы в зависимости от предшественников, удобрений и биопрепаратов / Н.С. Алметов, Н.В. Горячкин // Вестник Марийского государственного университета. – 2013. – № 11. – С. 7–9.
8. *Алметов, Н.С.* Применение биопрепарата азоризин – надежный способ повышения продуктивности и качества урожая ячменя / Н.С. Алметов, В.Р. Габдуллин, А.А. Алферов // Агрехимический вестник. – 2016. – Т. 2. – № 2. – С. 44–47.
9. *Алферов, А.А.* Эффективность применения биопрепарата на яровой пшенице в Европейской части России на разных фонах минерального питания – / А.А. Алферов, Л.С. Чернова, А.П. Кожемяков // Российская сельскохозяйственная наука. – 2017. – Т. 44. – № 6. – С. 53–57.
10. *Алферов, А.А.* Оценка эффективности действия азотного удобрения при использовании Ризоагрина на яровой пшенице / А.А. Алферов, Л.С. Чернова, Н.Я. Шмырева, А.А. Завалин // Плодородие. – 2016. – № 6. – С. 4–6.
11. *Андреианов, С.Н.* Формирование фосфатного режима дерново-подзолистых почв в разных системах удобрения / С.Н. Андреианов. – М.: ВНИИА, 2004. – 296 с.
12. *Андреева, Е.А.* Использование азотных удобрений по данным опытов, проведенных с изотопом ^{15}N / Е.А. Андреева, Г.М. Щеглова // Почвоведение. – 1964. – №12. – С. 47–54.
13. *Андреева, Е.А.* Использование растениями азота почвы и азота удобрений / Е.А. Андреева, Г.М. Щеглова // Агрехимия. – 1966. – №10. – С. 6–19.
14. *Андреева, Е.А.* Влияние систематического внесения удобрений на превращение и использование ^{15}N сульфата аммония растениями на черноземе типичном / Е.А. Андреева, Г.М. Щеглова // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 1978. – № 19. – С. 52–58.
15. *Андронов, Е.Е.* Анализ показателей почвенного микробиома в процессах, связанных с почвообразованием, трансформацией органического вещества и тонкой регуляции вегетационных процессов / Е.Е. Андронов, Е.А. Иванова, Е.В. Першина, О.В. Орлова, Ю.В. Круглов, А.А. Белимов, И.А. Тихонович // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2015. – Вып. 80. – С. 83–94.

16. Аужанова, А.Д. Оценка действия абиотических факторов и биопрепарата Ризоагрин на микробиологическую активность почвы, адаптивность и продуктивность яровой мягкой пшеницы: дис.... канд. биол. наук: 03.02.08 / Аужанова Асаргуль Дюсембаевна. – Омск, 2015. – 147 с.
17. Байрамов, Л.Э. Азотное питание и продуктивность ячменя при использовании биопрепаратов: автореф. дис.... канд. биол. наук: 06.01.04 / Байрамов Лютфийяр Эйзоб оглы. – М., 2001. – 21 с.
18. Бараев, А.И. Яровая пшеница / А.И. Бараев. – М.: Колос, 1978. – 429 с.
19. Барков, В.А. Эффективность применения диазотрофов в посевах ярового ячменя / В.А. Барков, А.В. Ваулин, О.В. Селицкая // Плодородие. – 2007– №3. – С. 19–20.
20. Башков, А.С. Влияние Ризоагрина и других биопрепаратов на урожайность и качество продукции яровой пшеницы / А.С. Башков // Научное обеспечение развития АПК в современных условиях: материалы Всероссийской научно-практической конференции (15–18 февр. 2011 г.) / ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА. – Ижевск, 2011. – Т. 1. – С. 3–9.
21. Безгодова, И.Л. Влияние минеральных удобрений и биопрепаратов на урожайность и качество ячменя и гороха в одновидовых и смешанных посевах на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве на Северо-Западе РФ: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Безгодова Ирина Леонидовна. – СПб. – Пушкин, 2009. – 20 с.
22. Белимов, А.А. Эффективность инокуляции ячменя смешанными культурами диазотрофов: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Белимов Андрей Алексеевич. – Л., 1990. – 19 с.
23. Беляков, И.И. Ячмень в интенсивном земледелии / И.И. Беляков. – М.: Росагропромиздат, 1990. – 176 с.
24. Бердников, А.М. Научное обоснование применения зеленых удобрений в современном земледелии на дерново-подзолистых почвах Полесья УССР: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.04 / Бердников Александр Михайлович. – Минск, 1990. – 38 с.
25. Бердников, А.М. Агроэкологическая и ресурсосберегающая роль севооборотов (на основе лизиметрических исследований) / А.М. Бердников, Е.П. Чмель, Л.В. Потапенко, М.А. Кризская // Агроэкологический журнал. – 2014. – №2. – С. 38–43.
26. Бердников, В.В. Влияние удобрений и биопрепаратов на продуктивность яровой пшеницы в условиях Республики Марий Эл: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Бердников Виталий Валентинович. – Йошкар-Ола, 2002. – 163 с.
27. Берестецкий, О.А. Азотфиксирующая активность в ризосфере и на корнях небобовых растений / О.А. Берестецкий, Л.Ф. Васюк // Известия АН СССР. Серия биологическая. – 1983 – № 1. С. 44–50.
28. Берестецкий, О.А. Биологические основы плодородия почвы / О.А. Берестецкий, Ю.М. Возняковская, Л.М. Доросинский. – М.: Колос, 1984а. – 287 с.
29. Берестецкий, О.А. Растительные остатки как энергетический материал при несимбиотической азотфиксации / О.А. Берестецкий, Н.М. Макарова, Л.В. Кравченко // Сельскохозяйственная биология. – 1984б. – №1. – С. 69–71.
30. Берестецкий, О.А. Биологические факторы повышения плодородия почв / О.А. Берестецкий // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1986. – № 3. – С. 29–38.
31. Богачев, А.Н. Система применения азотных удобрений под яровой ячмень, выращиваемый на обыкновенном черноземе, на кормовые и пивоваренные цели: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Богачев Анатолий Николаевич. – п. Персиановский, 2000. – 23 с.

32. *Борисова, Е.Е.* Влияние сельскохозяйственных культур и сидерации на урожайность яровой пшеницы на светло-серых почвах Нижегородской области / Е.Е. Борисова // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 8. – С. 61–64.
33. *Борисова, Е.Е.* Применение сидератов в мире / Е.Е. Борисова // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 6. – С. 24–33.
34. *Брей С.* Азотный обмен в растениях / пер. с англ. и предисл. Э.Е.Хавкина. – М.: Агропромиздат, 1986. – 200 с.
35. *Будажанов, Л.В.* Биокинетический цикл азота в системе почва – удобрение – растение в условиях Забайкалья: дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.04 / Будажанов Лубсан-Зонды Владимирович – М., 2009. – 341 с.
36. *Быков, Г.Н.* Влияние азотного удобрения на урожайность и качество зерна сортов яровой пшеницы: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Быков Геннадий Николаевич. – М., 2006. – 17 с.
37. *Вавилов, П.П.* Бобовые культуры и проблема растительного белка / П.П. Вавилов, Г.С. Посыпанов. – М.: Россельхозиздат, 1983. – 255 с.
38. *Валиуллин, И.Т.* Зависимость величины и химического состава урожая ярового ячменя от совместного применения макроудобрений и биопрепарата Ризоагрин / И.Т. Валиуллин, М.Ю. Гилязов // Агрохимический вестник. – 2010. – № 4. – С. 28–29.
39. *Варюшкина, Н.М.* Превращение азотных удобрений, внесенных в почву, по данным исследований с применением изотопа ^{15}N : автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04/ Варюшкина Н.М. – ТСХА. – М., 1967. – 24 с.
40. *Варюшкина, Н.М.* Превращение азота минеральных удобрений при ежегодном их внесении в дерново-подзолистые почвы: Сообщение 1 / Н.М. Варюшкина, М.В. Никифорова // Агрохимия. – 1982. – № 7. – С. 11-16.
41. *Варюшкина, Н.М.* Трансформация азота удобрений при ежегодном их внесении в дерново-подзолистые почвы / Н.М. Варюшкина, Л.И. Кирпанева // Почвоведение. – 1984. – № 10. – С. 116–120.
42. *Васюк, Л.Ф.* Азотфиксирующие микроорганизмы на корнях небобовых растений и их практическое использование / Биологический азот в сельском хозяйстве СССР, отв. ред. Е.Н. Мишустин. – М.: «Наука», 1989. – С. 88–97.
43. *Ваулин, А.В.* Оптимизация азотного питания ячменя при внедрении точного земледелия / А.В. Ваулин // Агрохимический вестник. – 2013. – № 1. – С. 15-16.
44. *Виниченко, Г.Н.* Разработка приемов выращивания редьки масличной в промежуточных посевах в условиях Центрального района Нечерноземной зоны: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.02.08. / Виниченко Геннадий Николаевич. – М., 1987. – 16 с.
45. *Виноградова, Л.В.* Роль ассоциативных диазотрофов в формировании урожая сортов яровой пшеницы: дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Виноградова Любовь Владимировна. – М., 1999 (а). – 139 с.
46. *Виноградова, Л.В.* Влияние инокуляции препаратами ассоциативных диазотрофов на интегральные характеристики фотосинтеза различных сортов яровой пшеницы / Л.В. Виноградова // Бюллетень ВИУА. – 1999 (б). – № 112. – С. 64–67.
47. *Войтович, Н.В.* Плодородие почв Нечерноземной зоны и его моделирование / Н.В. Войтович. – М.: Колос, 1997. – 388 с.
48. *Волков, Е.Г.* Влияние биопрепаратов и азотного удобрения на урожайность и качество зерна озимой ржи и ячменя на дерново-слабоподзолистой среднесуглинистой почве: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Волков Евгений Геннадьевич. – М.: Науч.-исслед. ин-т сел. хоз-ва Центр.-Чернозем. зоны, 2003. – 181 с.

49. *Волкогон, В.В.* Ассоциативная азотфиксация в корневой зоне представителей семейства злаковых: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.07 / Волкогон Виталий Васильевич. – Киев, 1987. – 28 с.
50. *Волкогон, В.В.* Приемы регулирования активности ассоциативной азотфиксации / В.В. Волкогон // Бюллетень института сельскохозяйственной микробиологии. – Чернигов. – 1997. – С. 17–19.
51. *Воробейков, Г.А.* Исследование эффективности штаммов ассоциативных ризобактерий в посевах различных видов растений / Г.А. Воробейков, Т.К. Павлова, С.В. Кондрат, В.Н. Лебедев, В.С. Юргина, В.В. Муратова, П.Н. Макаров, Г.И. Дубенская, И.А. Хмелевская // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. – 2011. – № 141. – С. 114–123.
52. *Воробьев, С.А.* Севообороты интенсивного земледелия / С.А. Воробьев. – М.: Колос, 1979. – 368 с
53. *Воробьев С.А.* Севообороты в специализированных хозяйствах Черноземья. – М.: Россельхозиздат, 1982. – 216 с.
54. *Гамзиков, Г.П.* Азот в земледелии Западной Сибири / Г.П. Гамзиков. – М.: Наука, 1981. – 265 с.
55. *Гамзиков, Г.П.* Агрохимия азота в агроценозах / Г.П. Гамзиков. – Новосибирск: Рос. акад. с.-х. наук, Сиб. отд.-ние. Новосиб. гос. аграр. ун-т, 2013. – 790 с.
56. *Гамзиков, Г.П.* Продуктивность зерновых культур и использование азота удобрений на серых лесных почвах / Г.П. Гамзиков, Э.А. Муравин, Л.В. Будажапов // Плодородие. – 2008. – № 6. – С. 11–13.
57. *Гамзиков, Г.П.* Возможности использования нетрадиционных удобрений в сибирском земледелии / Г.П. Гамзиков, О.И. Гамзикова, П.С. Широких // Достижение науки и техники. – 2012. – № 3. – С. 9–12.
58. *Гамзикова, О.И.* Генетика агрохимических признаков пшеницы / О.И. Гамзикова. – Новосибирск: СО РАСХН, 1994. – 220 с.
59. *Гамзикова, О.И.* Этюды по физиологии, агрохимии и генетике минерального питания растений / О.И. Гамзикова. – Новосибирск: ИПФ Агрос, 2008. – 372 с.
60. *Ганжара, Н.Ф.* Гумусообразование и агрономическая оценка органического вещества подзолистых и черноземных почв в Европейской части СССР: автореферат дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.03. / Ганжара Николай Федорович – М., 1988. – 31 с.
61. *Горячкин, Н.В.* Формирование продуктивности яровой пшеницы на фоне разных предшественников и применения удобрений в условиях северо-востока Волго-Вятского региона: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.01 и 06.01.04 / Горячкин Никандр Владимирович – М., 2013. – 23 с.
62. *Глушков, В.В.* Пожнивные сидеральные культуры и продуктивность ярового ячменя / В.В. Глушков // Плодородие. – 2013. – №4. – С. 39–40.
63. *Гужов, Ю.Л.* Селекция и семеноводство культурных растений / Ю.Л. Гужов, А. Фукс, П. Валичек. – М.: Агропромиздат, 1991. – 463 с.
64. *Державин, Л.М.* Современные методы определения доз минеральных удобрений. Обзорная информация / Л.М. Державин, Ш.И. Литвак, Е.В. Седова. – М.: ВНИИТЭИСХ. – 1988. – 44 с.
65. *Державин, Л.М.* Интегрированное применение агрохимических средств в зерновом хозяйстве / Л.М. Державин // Агрохимия. – 2007а – № 7. – С. 5–14.
66. *Державин, Л.М.* Интегрированное применение агрохимических средств в зерновом хозяйстве / Л.М. Державин // Агрохимия. – 2007б – № 12. – С. 3–17.
67. *Державин, Л.М.* Роль химизации и биологизации земледелия в отечественном производстве сельскохозяйственной продукции и обеспечение продовольственной безопасности Российской Федерации / Л.М. Державин // Агрохимия. – 2010 – № 9. – С. 3–18.

68. *Дмитриев, Н.Н.* Влияние окультуренности почвы на урожайность озимой пшеницы и картофеля и баланс меченого ^{15}N азота удобрения: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Дмитриев Николай Николаевич – М., 1990. – 22 с.
69. *Добровольская, Т.Г.* Структура бактериальных сообществ почв. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 282 с.
70. *Довбан, К.И.* Зеленое удобрение в современном земледелии. Вопросы теории и практики / К.И. Довбан. – Минск: Белорусская наука, 2009. – 404 с.
71. *Довбан, К.И.* Сидерация в интенсивном земледелии: Обзорная информация / К.И. Довбан, В.К. Довбан, Ф.Г. Бердников. – М.: ВНИИТЭИ агропром, 1992. – 68 с.
72. *Долгополова Н.В.* Влияние сидеральных культур на урожайность яровой пшеницы в Центральном Черноземье / Н.В. Долгополова // Региональный вестник. – 2017. – № 4. – С. 2–4.
73. *Дояренко, А.Г.* Пожнивные культуры. Опытное поле Петровской академии / А.Г. Дояренко. – Бюллетень № 25. – 1921.
74. *Доспехов, Б.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – 5-е изд. доп. и перераб. / Б.А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
75. *Евдокимов, И.В.* Иммобилизация азота почвенными микроорганизмами в зависимости от доз его внесения / И.В. Евдокимов, С. Саха, С.А. Благодатский, В.Н. Кудеяров // Почвоведение. – 2005. – № 5. – С. 581–589.
76. *Евдокимова, М.А.* Сортвые особенности азотного питания ячменя в условиях востока Нечерноземной зоны: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.09 и 06.01.04 / Евдокимова Маргарита Александровна. – Йошкар-Ола, 2005. – 23 с.
77. *Единый государственный реестр почвенных ресурсов России / Государственный информационный ресурс.* – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. – 2014. – <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/1sem.html>.
78. *Емцев, В.Т.* Микробиология: учебник для вузов / В.Т. Емцев, Е.Н. Мишустин. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Дрофа, 2005. – 445 с.
79. *Емцев, В.Т.* Эколого-географическая изменчивость почвенных анаэробных азотфиксаторов рода *Clostridium* / В.Т. Емцев, Т.Д. Дзадзамия // Известия ТСХА. – 1970. – № 6. – С. 125–136.
80. *Емцев, В.Т.* Микробиология на службе сельскохозяйственного производства / В.Т. Емцев // Известия ТСХА. – 1975. – № 6. – С. 3–18.
81. *Емцев, В.Т.* Несимбиотическая азотфиксация азота атмосферы в дерново-подзолистой почве и факторы, определяющие ее интенсивность / В.Т. Емцев, Н.П. Покровский, Т.А. Хрушкова // Известия ТСХА. – 1978. – № 1. – С. 118–123.
82. *Емцев, В.Т.* Несимбиотическая азотфиксация и закономерности ее функционирования в почве / В.Т. Емцев, П.К. Ницэ, Н.П. Покровский / Минеральный и биологический азот в земледелии СССР. – М.: Наука, 1985. – С. 213–221.
83. *Емцев, В.Т.* Эффективность фотосинтеза и активность фиксации азота в корневой зоне сельскохозяйственных растений / В.Т. Емцев, Л.К. Ницэ, Г.В. Годова / Минеральный и биологический азот в земледелии СССР (отв. ред. Е.Н. Мишустин). – М.: Наука, 1985. – С. 252–259.
84. *Емцев, В.Т.* Фиксация азота атмосферы в корневой зоне у различных зерновых культур / В.Т. Емцев, Л.К. Ницэ, Ф.Т. Ахмедов, М.В. Моторина, Г.Г. Гусейнов // Известия ТСХА. – 1989а. – № 1. – С. 89–99.
85. *Емцев В.Т.* Об ассоциативном симбиозе *Clostridium* с высшими растениями / В.Т. Емцев, М.И. Чумаков, М.Х. Брук / Биологический азот в сельском хозяйстве СССР. – М.: Наука. – 1989б. – С. 124–131.
86. *Жуковский, Е.Е.* Программирование урожаев: взгляд в прошлое и современность / Е.Е. Жуковский / в сб. Математические модели природных

и антропогенных экосистем. – СПб.: Изд-во Агрофизический научно-исследовательский институт РАСХН, 2014. – 191 с.

87. *Журавлева, Е.В.* Научное обоснование повышения продуктивности и качества зерна интенсивных сортов озимой пшеницы в земледелии Центрального Нечерноземья: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.01 / Журавлева Екатерина Васильевна. – Немчиновка, 2011. – 41 с.

88. *Журавлева, Е.В.* Генеалогические особенности сортов озимой пшеницы селекции Московского НИИСХ «Немчиновка» в связи с азотным питанием / Е.В. Журавлева // *Зерновое хозяйство России*. – 2012. – №6. – С. 12–16.

89. *Журина, Л.Л.* Агрометеорология. Учебник / Л.Л. Журина, А.П. Лосев. СПб.: ООО «КВАДРО», 2012. – 368 с.

90. *Жученко, А.А.* Стратегия адаптивной интенсификации сельского хозяйства / А.А. Жученко. – М.: Пушино, 1994. – 148 с.

91. *Жученко, А.А.* Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). Теория и практика. В трех томах. Том I / А.А. Жученко. – М.: Изд-во Агрорус, 2008. – 816 с.

92. *Завалин, А.А.* Удобрение сельскохозяйственных культур на осушаемых минеральных почвах центрального района России: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.04 / Завалин Алексей Анатольевич. – М., 1991. – 38 с.

93. *Завалин, А.А.* Удобрение сельскохозяйственных культур на осушаемых минеральных почвах / А.А. Завалин. – М.: Изд-во ВНИИА, 1995. – 138 с.

94. *Завалин, А.А.* Влияние препаратов азотфиксирующих микроорганизмов на питание и продуктивность яровой пшеницы / А.А. Завалин, Т.М. Кандаурова, Л.С. Чернова // *Агрохимия*. – 1997. – № 3. – С. 33–40.

95. *Завалин, А.А.* Действие биопрепарата Ризоагрин на продуктивность и азотное питание яровой пшеницы / А.А. Завалин, А.П. Кожемяков, Д.Б. Сологуб, Т.С. Зинковская // *Доклады Россельхозакадемии*. – 2001. – № 2. – С. 23–25.

96. *Завалин, А.А.* Азотное питание и продуктивность сортов яровой пшеницы / А.А. Завалин. – М.: Агроконсалт, 2003. – 152 с.

97. *Завалин, А.А.* Оценка доли влияния различных факторов на формирование урожая и технологические качества зерна растений яровой мягкой пшеницы в условиях Северо-Востока Нечерноземной зоны России / А.А. Завалин, А.В. Пасынков, Е.Н. Пасынкова // *Сельскохозяйственная биология* – 2003. – № 3. – С. 89–93.

98. *Завалин, А.А.* Действие удобрений и биопрепаратов на продуктивность сортов ячменя / А.А. Завалин, Т.М. Духанина, Х.А. Хусайнов, О.А. Ляличкин, В.А. Соколов, А.Л. Тарасов, С.И. Новоселов, М.А. Евдокимова // *Агрохимия*. – 2003. – № 1. – С.30–37.

99. *Завалин, А.А.* Эффективность применения биопрепаратов и удобрений под яровую пшеницу / А.А. Завалин, В.В. Бердников, Н.С. Алметов // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. – 2004 – №5. – С. 76–78.

100. *Завалин, А.А.* Биопрепараты, удобрения и урожай / А.А. Завалин. – М.: Изд-во ВНИИА, 2005. – 302 с.

101. *Завалин, А.А.* Азотное питание и прогноз качества зерновых культур / А.А. Завалин, А.В. Пасынков. – М.: Изд-во ВНИИА, 2007. – 208 с.

102. *Завалин, А.А.* Применение биопрепаратов и биологический азот в земледелии Нечерноземья / А.А. Завалин, Н.С. Алметов. – М.: Изд-во ВНИИА, 2009. – 152 с.

103. *Завалин, А.А.* Влияние удобрений и Флавобактерина на ячмень / А.А. Завалин, Н.С. Алметов, В.В. Бердников, Н.Е. Никандрова // *Плодородие*. – 2009. – № 3. – С. 35–36.

104. Завалин, А.А. Эффективность применения биопрепаратов в севообороте / А.А. Завалин, Н.С. Алметов, В.В. Бердников, Г.Г. Благовещенская // *Агрохимия*. – 2010. – № 6. – С. 28–37.
105. Завалин, А.А. Применение биопрепаратов при возделывании полевых культур / А.А. Завалин // *Достижения науки и техники АПК*. – 2011. – № 8. – С. 9–11.
106. Завалин, А.А. Управление азотным питанием растений в почве / А.А. Завалин, Г.Г. Благовещенская, Л.С. Чернова, Н.Я. Шмырева // *Агрохимический вестник*. – 2012. – № 4. – С. 38–40.
107. Завалин, А.А. Эффективность использования минеральных удобрений и биопрепаратов в зернотравяных севооборотах / А.А. Завалин, Н.С. Алметов, Л.С. Чернова // *Агрохимия*. – 2014. – № 9. – С. 35–47.
108. Завалин, А.А. Повышение эффективности минеральных удобрений при их биомодификации препаратом бисолбифит / А.А. Завалин, Л.С. Чернова, А.Ю. Гаврилова // *Плодородие*. – 2014. – № 6. – С. 6–8.
109. Завалин, А.А. Потоки азота в агроэкосистеме: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней / А.А. Завалин, О.А. Соколов. – М.: ВНИИА, 2016. – 591 с.
110. Завалин, А.А. Азот в агроэкосистеме на черноземных почвах / А.А. Завалин, О.А. Соколов, Н.Я. Шмырева. – М.: Изд-во РАН, 2018. – 180 с.
111. Завалин, А.А. Азот и качество зерна пшеницы / А.А. Завалин, О.А. Соколов // *Плодородие*. – 2018. – № 1. – С. 14–17.
112. Завалин, А.А. Экология азотфиксации / А.А. Завалин, О.А. Соколов, Н.Я. Шмырева. – М.: Изд-во РАН, 2019. – 252 с.
113. Заикин, В.П. Зеленые удобрения – путь интенсификации земледелия Нижегородской области / В.П. Заикин. – Н. Новгород, 1996. – 116 с.
114. Заикин, В.П. Научные основы использования зеленого удобрения в Волго-Вятском регионе / В.П. Заикин, В.В. Ивенин, Ф.П. Румянцев, С.Ю. Кривенков. – Н. Новгород: НГСХА, 2004. – 271.
115. Замятина, В.Б., Применение ^{15}N при изучении превращения азотных удобрений в почве и использование азота растениями / В.Б. Замятина, Д.А. Кореньков, Н.М. Варюшкина, Л.И. Романюк, В.В. Зерцалов // *Доклады ВАСХНИЛ*. – 1963. – Вып. 2. – С. 21–24.
116. Замятина, В.Б. Применение азота-15 при изучении использования растениями азотных удобрений и превращения их в почвах / В.Б. Замятина, Н.М. Варюшкина, В.В. Зерцалов / *Гос. ком. по использованию атомной энергии СССР. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т удобрений и агропочвоведения*. – М.: Атомиздат, 1965. – 10 с.
117. Зарипов, Н.В. Особенности формирования урожая яровой пшеницы и ячменя в зависимости от применения удобрений на серой лесной почве Предкамья Республики Татарстан: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.09 / Зарипов Наиль Васильевич. – Казань, 2008. – 17 с.
118. Звягинцев, Д.Г. Проблемы управления азотфиксаторами в ризосфере и ризоплане / Д.Г. Звягинцев // *Бюллетень ВНИИСХМ*. – Л. – 1985. – № 42. – С. 629.
119. Зезюков, Н.И. Сохранить плодородие черноземов / Н.И. Зезюков, Н.И. Придворев, В.И. Трунов, А.М. Баранов // *Земледелие*. – 1996. – № 5. – С. 6–7.
120. Зинковская, Т.С. Диазотрофы и их роль в азотном питании яровой пшеницы / Т.С. Зинковская // *Бюллетень ВИУА*. – 1999. – № 112. – С. 53–55.
121. Злотников, А.К. Ризосферная азотфиксирующая ассоциация *Klebsiella terrigena* E6 – *Bacillus firmus* и ее влияние на яровой ячмень при инокуляции: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.07 / Злотников Артур Кириллович. – М., 1998. – 26 с.
122. Злотников, А.К. Физиологические и биохимические свойства бактериальной ассоциации *Klebsiella terrigena* E6 и *Bacillus firmus* E3 /

А.К. Злотников, М.Л. Казакова, К.М. Злотников, А.В. Казаков, М.М. Умаров // Прикладная биохимия и микробиология. – 2007. – Т. 43. – № 3. – С. 338–346.

123. *Зюзина, Е.Н.* Формирование урожайности и посевных качеств семян яровой мягкой пшеницы под влиянием регуляторов роста и бактериальных препаратов в лесостепи Поволжья: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.09 / Зюзина Елена Николаевна. – Пенза, 2008. – 23 с.

124. *Иванов А.Л.* Приоритеты научного обеспечения земледелия / А.Л. Иванов, А.А. Завалин // Земледелие. – 2010. – № 7. – С. 3–6.

125. *Иванова, Т.И.* Оптимизация системы удобрения в севообороте с использованием математических моделей: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.04 / Иванова Тамара Ильинична. – М., 1988. – 37 с.

126. *Иванова, Т.И.* Прогнозирование эффективности удобрений с использованием математических моделей / Т.И. Иванова. – М.: Агропромиздат, 1989. – 235 с.

127. *Ивановский, К.В.* Влияние биопрепаратов в составе биокомпостов и при инокуляции семян на продуктивность растений: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Ивановский Константин Валерьевич. – М., 2005. – 18 с.

128. *Игнатов, В.В.* Биологическая фиксация азота и азотфиксаторы / В.В. Игнатов // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 9. – С. 28–33.

129. *Какпо, Р.С.К.* Применение интегрированной модели «DSSAT-SIG» для определения доз удобрений под кукурузу в южной и центральной части Бенина / Р.С.К. Какпо // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2015. – №1. – С. 22–26.

130. *Калашников, В.Д.* Изменение продуктивности и качества зерна ярового и озимого пивоваренного ячменя в зависимости от доз азотных удобрений при различных сроках посева и фонах основного минерального удобрения на черноземе выщелоченном западного предкавказья: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.09 / Калашников Вадим Дмитриевич. – Краснодар, 2005. – 24 с.

131. *Калининская, Т.А.* Трансформация в почве и использование азота, фиксированного несимбиотическими микроорганизмами / Т.А. Калининская, Ю.М. Миллер / Применение ¹⁵N в агрохимических исследованиях. – Новосибирск: Наука Сиб. отделение. – 1988. – С. 122–123.

132. *Кандаурова, Т.М.* Азотное питание и продуктивность яровой пшеницы: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Кандаурова Татьяна Михайловна. – М., 1997. – 21 с.

133. *Кант, Г.* Зеленое удобрение / Г. Кант. – М.: Колос, 1982. – 128 с.

134. *Каюмов, М.К.* Программирование продуктивности полевых культур: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / М.К. Каюмов. – М.: Росагропромиздат, 1989. – 368 с.

135. *Кидин, В.В.* Трансформация, состав потерь и баланс азота удобрений в системе почва-растение: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.03./ В.В. Кидин. – М., 1993. – 64 с.

136. *Кидин, В.В.* Основы питания растений и применения удобрений. Часть 1 (учебное пособие) / В.В. Кидин. – М.: РГАУ – МСХА, 2008. – 415 с.

137. *Кидин, В.В.* Система удобрений / В.В. Кидин. – М.: РГАУ – МСХА, 2011. – 535 с.

138. *Кириллова, Н.Н.* Влияние уровня загрязнения фторидами алюминиевого производства на деградацию серых лесных почв Байкальского региона / Н.Н. Кириллова, Л.В. Помазкина // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2014. – № 5. – С. 82–87.

139. *Клевенская, И.Л.* Олигопитрофильные микроорганизмы почв Западной Сибири / И.Л. Клевенская. – Новосибирск: Наука, 1974. – 220 с.

140. Клевенская, И.Л. Фиксация азота атмосферы свободноживущими микроорганизмами. Сообщение 2. Влияние температуры и влажности почвы на развитие азотфиксаторов / И.Л. Клевенская // Известия СО АН СССР. Серия биологических наук. – 1976. – № 15. – Вып. 3. – С. 17–21.

141. Клевенская, И.Л. Актуальная активность азотфиксации и ее искусственная стимуляция / И.Л. Клевенская, Н.М. Мозжерин / Применение ^{15}N в агрохимических исследованиях. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение. – 1988. – С. 124–125.

142. Клейменова, Т.В. Продуктивность яровой пшеницы в зависимости от реакции среды, использования удобрений и селенсодержащих соединений на черноземе выщелоченном в условиях лесостепи Среднего Поволжья: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.09 и 06.01.04 / Клейменова Тамара Валерьевна. – Пенза, 2007. – 23 с.

143. Климашевский, Э.Л. Генетический аспект минерального питания растений / Э.Л. Климашевский. – М.: Агропромиздат. – 1991. – 415 с.

144. Ковальская, Н.Ю. Паранодуляция корней небобовых растений (на примере *Brassica napus* var. *napus* и *Triticum aestivum*) / Н.Ю. Ковальская, Е.С. Лобакова, А.Х. Биабани, М.М. Умаров // Доклады по экологическому почвоведению. – 2006. – №1, вып.1. – С. 102–118.

145. Кодзокова, М.Х. Эффективность использования минеральных удобрений и Флавобактерина под гибриды кукурузы в предгорной зоне Кабардино-Балкарской Республики: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Кодзокова Марина Хабаловна. – п. Персиановский. – 2009. – 23 с.

146. Кожемяков, А.П. Перспективы применения биопрепаратов азотфиксирующих микроорганизмов в сельском хозяйстве / А.П. Кожемяков, А.В. Хотянович // Бюллетень ВИУА. – 1997. – №110. – С. 4-5.

147. Кожемяков, А.П. Разработка и перспективы использования биопрепаратов комплексного действия/ А.П. Кожемяков, С.В. Тимофеева, Т.А. Попова // Защита и карантин растений. – 2008. – № 2. – С. 42–43.

148. Кожемяков, А.П. Создание и анализ базы данных по эффективности микробных биопрепаратов комплексного действия / А.П. Кожемяков, С.Н. Белоброва, А.Г. Орлова // Сельскохозяйственная биология. – 2011. – № 3. – С. 112–115.

149. Козеичева, Е.С. Влияние агрохимических свойств почв Центрального Нечерноземья на эффективность азотных удобрений: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04. / Козеичева Елизавета Сергеевна. – М., 2011. – 17 с.

150. Козлечков, Г.А. Обоснование модели динамики выноса азота, фосфора и калия растениями пшеницы для оптимизации режима минерального питания / Г.А. Козлечков, А.В. Лабынцев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета – 2012. – № 81. – С. 546–560.

151. Козлова, Ю.Е. Структурно-функциональные особенности комплекса микроорганизмов самовосстанавливающейся дерново-подзолистой почвы / Ю.Е. Козлова, Н.В. Козлова, М.В. Горленко, М.М. Умаров // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2008. – № 4. – С. 40–45.

152. Конарев, В.Г. Белки пшеницы / В.Г. Конарев. – М.: Колос, 1980. – 351 с.

153. Коновалов, Ю.Б. Формирование продуктивности колоса яровой пшеницы и ячменя / Ю.Б. Коновалов. – М.: Колос, 1981. – 174 с.

154. Кононова, М.М. Проблемы органического вещества почв на современном этапе / М.М. Кононова // Органическое вещество целинных и освоенных почв. – М.: Наука, 1972. – С. 7–29.

155. Кореньков, Д.А. Агрохимия азотных удобрений / Д.А. Кореньков. – М.: Наука, 1976. – 224 с.

156. Кореньков, Д.А. Продуктивное использование минеральных удобрений / Д.А. Кореньков. – М.: Россельхозиздат, 1985. – 221 с.
157. Кореньков, Д.А. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений / Д.А. Кореньков. – М.: Агроконсалт, 1999. – 296 с.
158. Кореньков, Д.А. Превращение азотных удобрений в почве при внесении их под разные культуры / Д.А. Кореньков, И.А. Лаврова // Агрохимия. – 1974. – №5. – С.12–17.
159. Кореньков, Д.А. Применение стабильного изотопа ^{15}N при изучении баланса азота удобрений в полевых лизиметрах на дерново-подзолистой супесчаной почве / Д.А. Кореньков, Л.И. Романюк, Н.М. Варюшкина, Л.И. Кирпанева // Агрохимия. – 1975. – № 4. – С. 3–8.
160. Кореньков, Д.А. Использование азота луговыми злаковыми травами и его баланс на некоторых почвенных разностях Нечерноземной зоны СССР / Д.А. Кореньков, Е.Ф. Руделев, Д.А. Филимонов // Агрохимия. – 1980. – № 2. – С. 3-8.
161. Кореньков, Д.А. Удобрения, их свойства и способы использования / Д.А. Кореньков, И.И.Синягин, А.В. Петербургский / под ред. Д.А. Коренькова – М.: Колос, 1982. – 415 с.
162. Косинова, Л.Ю. Воздействие минерального азота на несимбиотическую азотфиксацию черноземов / Л.Ю. Косинова, П.И. Гантимурова // Проблема азота в интенсивном земледелии: Тез. докл. Всесоюз. совещ. (Новосибирск, 23–28 июля 1990 г.) / ВАСХПИЛ. Сиб. отд-ние. СибПНИИЗХим. – Новосибирск, 1990. – С. 188–189.
163. Кравченко, Л.В. Роль корневых экзометаболитов в интеграции микроорганизмов с растениями: автореф. дис. ... докт. биол. наук: 03.00.07. / Кравченко Лев Витальевич. – М., 2000. – 51 с.
164. Кретович, В.Л. Биохимия зерна / В.Л. Кретович. – М.: Наука, 1981. – 150 с.
165. Кретович, В.Л. Молекулярные механизмы усвоения азота растениями / В.Л. Кретович, З.Г. Евстигнеева, Т.И. Карякина, Н.П. Львов, С.С. Мелик-Саркисян, А.В. Пушкин, В.И. Романов, Ж.Б. Успенская, В.Р. Шатилов – М.: Наука, 1983 – 264 с.
166. Кретович, В.Л. Усвоение и метаболизм азота у растений / В.Л. Кретович. – М.: «Наука», 1987 – 486 с.
167. Кретович, В.Л. Биохимия усвоения азота воздуха растениями / В.Л. Кретович. – М.: Наука, 1994.–167 с.
168. Кудяров, В.Н. Цикл азота в почве и эффективность удобрений / В.Н. Кудяров. – М.: Наука, 1989. –216 с.
169. Кудяров, В.Н. Баланс азота и трансформация азотных удобрений в почвах / В.Н. Кудяров, П. Биелек, О.А. Соколов, К. Кноп, Я. Пругар, В.М. Семенов, В.Н. Башкин, А. Моцик, И. Скорженова, В.П. Шабаев, В.И. Никитишен. – Пушкино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1986. – 160 с.
170. Кудяров, В.Н. Оценка размеров несимбиотической азотфиксации в почве методом баланса / В.Н. Кудяров, Т.В. Кузнецова // Почвоведение. – 1990. – № 11. – С. 79–89.
171. Кудяров, В.Н. Изменение внутрпочвенных потоков азота при внесении азотных удобрений / В.Н. Кудяров, С.А. Благодатский, А.А. Ларионова // Агрохимия. – 1990. – № 11. – С. 47–53.
172. Кудяров, В.Н. Поступление азота в почву при несимбиотической азотфиксации / В.Н. Кудяров / в кн. Современное развитие научных идей Д.Н. Прянишникова: Сборник научных трудов. – М.: Наука, 1991. – С. 155–169.
173. Кудяров, В.Н. Азотный цикл и продуцирование закиси азота / В.Н. Кудяров // Почвоведение. – 1999. – № 8. – С. 988–998.

174. Кудеяров, В.Н. Оценка питательной деградации пахотных почв России / В.Н. Кудеяров // Вестник Российской академии наук. – 2015. – Т.85. – №9. – С. 771–775.

175. Кудеяров, В.Н. Современное состояние почв агроценозов России, меры по их оздоровлению и рациональному использованию / В.Н. Кудеяров, М.С. Соколов, А.П. Глинушкин // Агрохимия. – 2017. – №6. – С. 3–11.

176. Кузнецова, Т.В. О сопряженности процессов метаболизма углерода и азота в почве / Т.В. Кузнецова, А.С. Тулина, Л.Н. Розанова, В.М. Семенов, В.Н. Кудеяров // Почвоведение. – 1998. – № 7. – С. 832–839.

177. Кузнецова, Т.В. Трансформация азота почвы и органических остатков сообществом микроорганизмов и микроскопических животных / Т.В. Кузнецова, А.К. Ходжаева, М.А. Семенова, Л.А. Иванникова, В.М. Семенов // Агрохимия. – 2006. – № 6. – С. 5–12.

178. Кузьминых, А.Н. Микробиологическая активность почвы паровых полей / А.Н. Кузьминых, С.Г. Манишкин, В.Р. Габдуллин // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2011. – №6. – С. 49-51.

179. Кулаковская, Т. Н. Оптимальные параметры плодородия почв / Т.Н. Кулаковская – М.: Колос, 1984. – 272 с.

180. Кулаковская, Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений / Т.Н. Кулаковская. – М.: Агропромиздат, 1990. – 219 с.

181. Кунакова, А.М. Взаимодействие ассоциативных ризобактерий с растениями при различных агроэкологических условиях: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.07 / Кунакова Анна Мирославовна. – СПб., 1998. – 20 с.

182. Курсакова, В.С. Работа фотосинтетического аппарата яровой мягкой пшеницы в условиях умеренно засушливой колочной степи Алтайского края при использовании биопрепаратов несимбиотических азотфиксирующих бактерий / В.С. Курсакова, Л.А. Ступина, Драчев Д.В. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 7 (69). – С. 13–18.

183. Лаврентьева, А.С. Трансформация и баланс азота в агроэкосистемах с картофелем в севообороте на темно-серой лесной почве лесостепи Прибайкалья / А.С. Лаврентьева, Л.В. Помазкина // Агрохимия. – 1999. – № 11. – С. 3–5.

184. Лаврова, И.А. Превращение азота удобрений в системе почва – растение и повышение их эффективности: автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Лаврова Ирина Александровна. – М., 1992. – 37 с.

185. Ладонин, В.Ф. Сравнительная оценка методов расчета доз удобрений на планируемый урожай / В.Ф. Ладонин, С.М. Крамаров, И.Е. Коваленко и др. // Доклады Россельхозакадемии. – 1999. – №1. – С. 22–24.

186. Лактионов, Ю.В. Урожайность и качество сельскохозяйственной продукции при использовании биопрепаратов / Ю.В. Лактионов, А.П. Кожемяков, В.В. Яхно, В.И. Корчагин, Н.А. Сумина // Агромир Черноземья. – 2013. – № 1-2 (103). – С. 24–25.

187. Лекомцев, П.В. Влияние уровня азотного питания и биопрепаратов на формирование продуктивности яровой пшеницы и гороха в чистых и смешанных посевах: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Лекомцев Петр Валентинович. – М., 2002. – 23 с.

188. Литвак, Ш.И. Системный подход к агрохимическим исследованиям / Ш.И. Литвак. – М.: Агропромиздат, 1990. – 220 с.

189. Литвинцева Т.А. Эффективность минеральных и бактериальных удобрений на посевах пивоваренного ячменя в условиях Алтайского приобья: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Литвинцева Татьяна Алексеевна. – Барнаул, 2008 – 19 с.

190. Литтл, Т.М. Сельскохозяйственное опытное дело. Планирование и анализ.

/ Т.М. Литтл, Ф.Дж. Хиллз / пер. с англ. Б.Д. Кирюшина под. ред. Д.В. Васильевой. – М.: Колос, 1981. – 320 с.

191. *Личман, Г.И.* Основные принципы и перспективы применения точного земледелия / Г.И. Личман, Н.М. Марченко, В.М. Дринча. – М.: РАСХН, 2004. – 81 с.

192. *Лобкова, В.Т.* Влияние органических удобрений и возделываемых культур на азотный режим темно-серой лесной почвы / В.Т. Лобкова, Ю.А. Бобкова // *Агрохимия*. – 2015. – № 10. – С. 3–9.

193. *Лошаков, В.Г.* Промежуточные культуры в севооборотах Нечерноземной зоны / В.Г. Лошаков. – М.: Россельхозиздат, 1980. – 126 с.

194. *Лошаков, В.Г.* Промежуточные культуры как фактор интенсификации земледелия и окультуривания дерново-подзолистых почв: автореферат ... дисс. д-ра с.-х. наук: 06.01.01. / Лошаков Владимир Григорьевич. – М., 1982. – 36 с.

195. *Лошаков, В.Г.* Изменение некоторых показателей плодородия дерново-подзолистой почвы в специализированных зерновых севооборотах и при бессменном возделывании зернофуражных культур с использованием пожнивного сидерата и соломы в качестве удобрения / В.Г. Лошаков, Ф. Эллмер, С.Ф. Иванова, Ю.Н. Синих // *Известия ТСХА*. – 1995. – вып. 1. – С. 3–15.

196. *Лошаков, В.Г.* Продуктивность зерновых севооборотов при использовании зеленого удобрения / В.Г. Лошаков, Ю.Д. Иванов, Ю.Н. Синих // *Известия ТСХА*. – 1997. – Вып. 3. – С. 3–20.

197. *Лошаков, В.Г.* Влияние длительного применения пожнивного зеленого удобрения на агрофизические свойства дерново-подзолистой почвы / В.Г. Лошаков, В.А. Николаев // *Известия ТСХА*. – 1999. – Вып. 2. – С. 29–40.

198. *Лошаков, В.Г.* Севооборот и плодородие почвы / В.Г. Лошаков / под ред. Сычева В.Г. – М.: ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2012. – 512 с.

199. *Лошаков, В.Г.* Зеленое удобрение в земледелии Нечерноземной зоны / В.Г. Лошаков // *Владимирский Земледелец*. – 2013 (а). – № 1. – С. 13–18.

200. *Лошаков, В.Г.* Экологические проблемы современных агроландшафтов / В.Г. Лошаков / *Экология и культура: от прошлого к будущему*. – Ярославль-Борок, НИИ биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 2013 (б). – С. 13–19.

201. *Лошаков, В.Г.* Зеленые удобрения в земледелии России / В.Г. Лошаков / под ред. Сычева В.Г. – М.: ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2015. – 300 с.

202. *Лукин, С.А.* Азоспириллы и ассоциативная азотфиксация небобовых культур в практике сельского хозяйства / С.А. Лукин, П.А. Кожевин, Д.Г. Звягинцев // *Сельскохозяйственная биология*. – 1987. – № 1. – С. 51–58.

203. *Лукин, С.А.* Динамика азоспирилл в ризосфере ячменя и гороха / С.А. Лукин, П.А. Кожевин, Д.Г. Звягинцев // *Микробиология*. – 1989. – Т. 58 – № 1. – С. 133–146.

204. *Лукин, С.М.* Влияние биопрепаратов ассоциативных азотфиксирующих микроорганизмов на урожайность сельскохозяйственных культур / С.М. Лукин, Е.В. Марчук // *Достижения науки и техники*. – 2011. – №8. – С. 18–21.

205. *Ляличкин, О.А.* Влияние биопрепаратов и удобрений на урожайность и качество зерна ячменя / О.А. Ляличкин // *Достижения науки и техники*. – 2011. – №8. – С. 29–31.

206. *Любимов, В.И.* Биохимия фиксации молекулярного азота / В.И. Любимов – М.: Наука. – 1969 – 156 с.

207. *Матюк, Н.С.* Роль сидератов в экологизации и биологизации земледелия / Н.С. Матюк, Г.Д. Гогмачадзе, С.С. Солдатова, В.Г. Безуглов // *АгроЭкоИнфо*. – 2010. – № 1. – URL: <http://www.Agroecoinfo.narod.ru/>.

208. *Матюк, Н.С.* Роль сидератов и соломы в стабилизации процессов трансформации органического вещества в дерново-подзолистой почве / Н.С. Матюк, О.В. Селицкая, С.С. Солдатова // *Известия ТСХА*. – 2013. – Вып. 3. – С. 63–74.

209. Мерзлая, Г.Е. Рекомендации по эффективному использованию соломы и сидератов в земледелии / Г.Е. Мерзлая, Л.М. Державин, А.А. Завалин, В.Г. Лошаков, Г.И. Ваулина, А.В. Козлова, Т.А. Яковлева / под ред. В.Г.Сычева. – М.: ВНИИА, 2012. – 44 с.

210. Методические рекомендации по использованию сидеральных культур с целью сохранения почвенного плодородия / под общ. ред. Л.М. Козловой. – Киров, 2009. – 56 с.

211. Методическое руководство по проектированию применения удобрений в технологиях адаптивно-ландшафтного земледелия / под ред. А.И. Иванова, Л.М. Державина. – М.: Россельхозакадемия, 2008. – 394 с.

212. Мильто, Н.И. Клубеньковые бактерии и продуктивность бобовых растений / Н.И. Мильто. – Минск: Наука и техника, 1982. – 296 с.

213. Мингалев С.К. Солома и сидерат как удобрение и способы их заделки / С.К. Мингалев // Аграрный вестник Урала. – 2015. – № 6. – С. 10–13.

214. Минеев, В.Г. Биологическое земледелие и минеральные удобрения / В.Г. Минеев, Б. Дебрецenni, Т. Мазур / под ред. Минеева В.Г. – М.: Колос, 1993. – 413 с.

215. Минибаев, Ф.Р. Азотфиксирующая активность микроорганизмов черноземов и серых лесных почв: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.07. / Минибаев Фархат Руфилович. – Уфа, 1990. – 23 с.

216. Миркин, Б.М. Управление функцией агроэкосистемы: экологический аспект / Б.М. Миркин, Л.Г. Наумова, Р.М. Хазиахметов // Успехи современной биологии. – 2001. – Т. 121. – №3. – С. 227–240.

217. Миронова, М.Е. Влияние регуляторов роста и бактериальных препаратов на формирование урожайности ячменя в условиях лесостепи Поволжья: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.09 / Миронова Мария Евгеньевна. – Пенза, 2009. – 182 с.

218. Михайловская, Н.А. Азоспириллы и их влияние на злаковые культуры / Н.А. Михайловская // Почвоведение и агрохимия (Республика Беларусь). – 2015. – №2. – С. 167–181.

219. Мишустин, Е.Н. Биологическая фиксация атмосферного азота / Е.Н. Мишустин, В.К. Шильникова. – М.: Наука, 1968. – 531 с.

220. Мишустин, Е.Н. Микроорганизмы и продуктивность земледелия / Е.Н. Мишустин. – М.: Наука, 1972. – 343 с.

221. Мишустин, Е.Н. Клубеньковые бактерии и инокуляционный процесс / Е.Н. Мишустин, В.К. Шильникова – М.: Наука, 1973. – 289 с.

222. Мишустин, Е.Н. Почвенные азотфиксирующие бактерии рода *Clostridium* / Е.Н. Мишустин, В.Т. Емцев. – М.: Наука, 1974. – 251 с.

223. Мишустин, Е.Н. Ассоциации почвенных микроорганизмов. – М.: Наука, 1975. – 106 с.

224. Мишустин, Е.Н. Роль бобовых культур и свободноживущих азотфиксирующих микроорганизмов в азотном балансе земледелия / Е.Н. Мишустин, Н.И. Черепков / Круговорот и баланс азота в системе почва-удобрение-растение-вода. – М.: Наука, 1979. – С. 9–18.

225. Мишустин, Е.Н. Пути улучшения азотного баланса пахотных почв СССР и выполнение продовольственной программы / Е.Н. Мишустин // Известия АН СССР. Серия биологическая. – 1983. – №3. – С. 325–345.

226. Моделирование плодородия почв: (Теория и методология): Методические рекомендации / ВАСХНИЛ, Почвенный институт им. В.В. Докучаева (разраб. Д. Н. Дурмановым и др.). – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1990. – 124 с.

227. Моисеев, Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука, 1981. – 487 с.

228. Мосолов, И.В. Физиологические основы применения минеральных удобрений / И.В. Мосолов. – М.: Колос, 1979. – 255 с.

229. *Муравин, Э.А.* Вопросы азотного питания растений и повышения эффективности азотных удобрений: автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Муравин Эрнст Аркадьевич. – М.: ТСХА, 1991. – 57 с.
230. *Назарюк, В.М.* Баланс и трансформация азота в агроэкосистемах / В.М. Назарюк. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 256 с.
231. *Назарюк, В.М.* Эколого-агрохимические и генетические проблемы регулируемых агроэкосистем / В.М. Назарюк. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 240 с.
232. *Налиухин, А.Н.* Оптимизация применения минеральных удобрений под лен-долгунец в зависимости от комплекса агрохимических свойств дерново-подзолистых почв Нечерноземной зоны России: дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.04 / Налиухин Алексей Николаевич. – М., 2015. – 326 с.
233. *Неттевич, Э.Д.* Выращивание пивоваренного ячменя / Э.Д. Неттевич, З.Ф. Анканова, Л.М. Романова. – М.: Колос, 1981. – 207 с.
234. *Никитин, С.Н.* Оценка эффективности применения удобрений, биопрепаратов и диатомита в лесостепи Среднего Поволжья: дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.04 / Никитин Сергей Николаевич. – Ульяновск, 2015. – 419 с.
235. *Никитин, С.Н.* Оценка эффективности применения удобрений, биопрепаратов и диатомита в лесостепи Среднего Поволжья / С.Н. Никитин. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – 316 с.
236. *Никифорова, М.А.* Превращение азота органических и минеральных удобрений в дерново-подзолистых почвах и потери элементов с инфильтрационными водами: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Никифорова Марина Викторовна. – Москва, 1998. – 22 с.
237. *Никифорова, С.А.* Эффективность предпосевной обработки семян ячменя биопрепаратами и диатомитовым порошком в условиях среднего Поволжья: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Никифорова Светлана Александровна. – Саранск, 2009. – 18 с.
238. *Новоселов, С.И.* Эффективность минеральных удобрений в севооборотах с различными видами паров / С.И. Новоселов, И.Г. Хлебников, С.А. Горохов // Плодородие. – 2011. – № 5. – С. 21–22.
239. *Новоселова, Е.С.* Влияние биологического азота на урожайность и качество зерна яровой пшеницы на дерново-подзолистой почве востока Нечерноземной зоны: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Новоселова Екатерина Сергеевна. – Саранск, 2007. – 22 с.
240. *Нормативы выноса элементов питания сельскохозяйственными культурами.* – М.: ЦИНАО, 1991. – 66 с.
241. *Огородников, Л.П.* Оценка севооборотов в полевых и лизимитрических исследованиях / Л.П. Огородников, П.А. Постников // Плодородие. – 2015. – №5. – С. 39–41.
242. *Одум, Ю.* Экология: в 2-х т. Т. 1. Пер. с англ. / Юджин Одум. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
243. *Орлов, Д.С.* Органическое вещество почв Российской Федерации / Д.С. Орлов, О.Н. Бирюкова, Н.И. Суханова. – М.: Наука, 1996. – 254 с.
244. *Осипов, А.И.* Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Книга 4. Роль азота в плодородии почв и питании растений / А.И. Осипов, О.А. Соколов. – СПб., 2001. – 360 с.
245. *Оценка эффективности микробных препаратов в земледелии* / под общ. ред. А.А. Завалина. – М.: РАСХН, 2000. – 82 с.
246. *Павлов, А.Н.* Накопление белка в зерне пшеницы и кукурузы / А.Н. Павлов. – М.: Наука, 1967. – 339 с.

247. Павлов, А.Н. Повышение содержания белка в зерне / А.Н. Павлов. – М.: Наука, 1984. – 119 с.
248. Панкратова, Е.М. Фиксация атмосферного азота сине-зелеными водорослями в природных условиях / Е.М. Панкратова // Ботанический журнал. – 1973. – Т. 58. – № 3. – С. 360.
249. Панкратова, Е.М. Роль азотфиксирующих сине-зеленых водорослей (цианобактерий) в накоплении азота и повышении плодородия почвы: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.07 / Панкратова Евгения Матвеевна. – Киров, 1980. – 39 с.
250. Панников, В.Д. Почвы, климат, удобрения и урожай / В.Д. Панников, В.Г.Минеев. – М.: Агропромиздат. – 1987. – 211 с.
251. Пасынков, А.В. Агрохимические закономерности формирования продуктивности и качества зерновых культур: дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.04 / Пасынков Александр Васильевич. – М., 2004. – 435 с.
252. Пасынкова, Е.Н. Агрохимические приемы регулирования урожайности и качества зерна пшеницы: дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.04 / Пасынкова Елена Николаевна. – Киров, 2013. – 340 с.
253. Петр, И. Погода и урожай / пер. с чешского и предисловие З.К. Благовеценской. – М.: Агропромиздат, 1990. – 332 с.
254. Петюренко, М.Ю. Влияние нитродукции в почву бактерий рода *Pseudomonas*, способных фиксировать азот, на продуктивность сахарной свеклы: автореф. дис.... канд. с.-х. наук: 06.01.01 / Петюренко Марта Юрьевна. – Рамонь, 2016. – 24 с.
255. Пигарева, Н.Н. Баланс и трансформация азота удобрений в криолитозоне Забайкалья / Н.Н. Пигарева // Агрохимия. – 2007. – №2. – С. 23–28.
256. Пищик, В.Н. Влияние бактерий *Bacillus subtilis* на физиологическое состояние растений пшеницы и микробоценоз почвы при использовании различных доз азотных удобрений / В.Н. Пищик, Н.И. Воробьев, К.Г. Моисеев, О.В. Свиридова, В.Г. Сурин // Почвоведение. – 2015. – №1. – С. 87–94.
257. Подколзин, А.И. Эволюция, воспроизводство плодородия почв и оптимизация применения удобрений в агроландшафтах Центрального Предкавказья: автореф. дис.... д-ра биол. наук: 06.01.04 / Подколзин Анатолий Иванович. – М., 2008. – 46 с.
258. Полев, Н.А. Теоретические подходы к моделированию плодородия почвы на основе достигнутого уровня урожайности и оценки земель по их потенциальной продуктивности: автореф. дис.... д-ра с.-х. наук: 06.01.01 / Полев Николай Андреевич. – М., 1995. – 45 с.
259. Полуэктов, Р.А. Динамические модели агроэкосистемы / Р.А. Полуэктов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 312 с.
260. Полуэктов, Р.А. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж. – С. -Пб; Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2006. – 396 с.
261. Помазкина, Л.В. Агрохимия азота в таежной зоне Прибайкалья / Л.В. Помазкина. – Новосибирск: Наука, 1985. – 176 с.
262. Помазкина, Л.В. Трансформация соединений азота и углерода в составе гумусовых веществ серой лесной почвы лесостепи Прибайкалья / Л.В. Помазкина, Е.В. Лубнина, С.Ю. Зорина, Л.Г. Котова, И.В. Хартоломей // Почвоведение. – 1996. – № 11. – С. 1320.
263. Помазкина, Л.В. Биогеохимический мониторинг и оценка режимов функционирования агроэкосистем на техногенно загрязняемых почвах / Л.В. Помазкина, Л.Г. Котова, Е.В. Лубнина. – Новосибирск: СО Наука, 1999. – 208 с.

264. *Помазкина, Л.В.* Новый интегральный подход к оценке режимов функционирования агроэкосистем и экологическому нормированию антропогенной нагрузки, включая техногенное загрязнение почв / Л.В. Помазкина // Успехи современной биологии. – 2004. – Том. 124. – № 1. – С. 66–76.

265. *Помазкина, Л.В.* Сравнительная оценка состояния агроэкосистем на разных типах почв Прибайкалья, загрязненных фторидами алюминиевого производства / Л.В. Помазкина, Л.Г. Котова, С.Ю. Зорина, А.В. Рыбакова // Почвоведение. – 2008. – № 6. – С. 717–725.

266. *Помазкина, Л.В.* Интегральная оценка экологической нагрузки на агроэкосистемы при техногенном загрязнении фторидами агроземов Байкальской природной территории / Л.В. Помазкина, Л.Г. Соколова, С.Ю. Зорина, Н.Н. Ковалева // Агрохимия. – 2011. – № 11. – С. 78–84.

267. *Помазкина, Л.В.* Оценка влияния климатических факторов и загрязнения аллювиальных почв тяжелыми металлами на функционирование агроэкосистем байкальского региона / Л.В. Помазкина // Агрохимия. – 2018. – № 4. – С. 78–87.

268. *Постников, Д.А.* Сравнительная экологическая оценка традиционных и перспективных сидеральных культур в условиях Московской области / Д.А. Постников, В.Г. Лошаков, С. Темирбекова, М.С. Мирон, А.А. Курило // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – № 8. – С. 39–43.

269. *Проведение полевых и производственных опытов по разработке и совершенствованию систем комплексного применения средств химизации в интенсивных технологиях возделывания зерновых культур: Метод. указания / ВАСХНИЛ ВНИИ удобрений и агропочвоведения им. Д. Н. Прянишникова; (Разраб. В. Г. Минеевым и др.). – М.: Б. и., 1985. – 87 с.*

270. *Прохорова, З.А.* Изучение и моделирование плодородия почв на базе длительного полевого опыта / З.А. Прохорова, А.С. Фрид. – М.: Наука, 1993. – 190 с.

271. *Прошкин, В.А.* Использование прогнозирования урожая в системе агрохимического обслуживания земледелия / В.А. Прошкин, Ю.С. Авдеев // Агрохимия. – 1994. – № 1. – С. 24–30.

272. *Прошкин, В.А.* Оценка тесноты и достоверности связи прибавки урожайности озимой пшеницы и агрохимических свойств почвы / В.А. Прошкин // АгроЭкоИнфо. – 2010. – № 2. – [http://agroecoinfo.narod.ru/journal/ STATYI / 2010 / 2 / st12doc](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2010/2/st12doc).

273. *Прошкин, В.А.* Характеристика моделей прогноза эффективности минеральных удобрений / В.А. Прошкин // Плодородие. – 2011. – № 3. – С. 27–31.

274. *Прошкин, В.А.* Модель прогноза прибавки урожайности озимой пшеницы при применении фосфорных удобрений / В.А. Прошкин, С.Н. Андрианов, Е.В. Шаброва // Агрохимия. – 2011. – № 6. – С. 19–26.

275. *Прошкин, В.А.* Моделирование эффективности минеральных удобрений по показателям агрохимических свойств почвы / В.А. Прошкин // Агрохимия. – 2012. – № 7. – С. 16–27.

276. *Прошкин, В.А.* Прогноз эффективности применения азотных удобрений под картофель по агрохимическим свойствам дерново-подзолистых почв / В.А. Прошкин, С.В. Швыркина // Плодородие. – 2013. – № 6. – С. 5–7.

277. *Прошкин, В.А.* Модель прогноза прибавки урожайности картофеля при применении фосфорных удобрений / В.А. Прошкин // Агрохимия. – 2014. – № 7. – С. 17–26.

278. *Прошкин, В.А.* Эффективность применения фосфорных удобрений под пшеницу в зависимости от агрохимических свойств почв / В.А. Прошкин, Е.С. Козеичева // Агрохимия. – 2015. – № 3. – С. 34–42.

279. *Прянишников, Д.Н.* О влиянии реакции почвы на рост растений / Д.Н. Прянишников // Удобрение и урожай. – 1931. – № 1. – С. 53–60.

280. Прянишников, Д.Н. Избранные сочинения/ Д.Н. Прянишников. – М.: «Академия наук СССР», 1952. – 634 с.

281. Прянишников, Д.Н. Избранные труды / Д.Н. Прянишников. – М.: «Наука», 1976. – 591 с.

282. Пухальская, Н.В. Закономерности формирования продуктивности зерновых культур при изменении уровня углеродного и азотного питания в оптимальных и экстремальных условиях выращивания: автореф. ... дисс. д-ра биол. наук: 06.01.04 / Пухальская Нина Витальевна. – М., 1997. – 45 с.

283. Пуховский, А.В. Метод аппроксимации и калибровки модели Митчерлиха-Спиллмана-Бауле-Богуславского / А.В. Пуховский, Н.Ф. Хохлов // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2011. – №1. – С. 31–34.

284. Рашкович, Н.Л. Моделирование показателей минерального питания растений методом регрессионного анализа / Н.Л. Рашкович // Агрохимия. – 1995. – № 6. – С. 97–106.

285. Редькина, Т.В. Механизм положительного влияния бактерий рода *Azospirillum* на высшие растения / Т.В. Редькина / Биологический азот в сельском хозяйстве СССР. – М.: Наука, 1989. – С. 132–141.

286. Рекомендации по проектированию интегрированного применения средств химизации в ресурсосберегающих технологиях адаптивно-ландшафтного земледелия: инструктивно-методическое издание. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 464 с.

287. Романенков, В.А. Использование моделей трансформации органического углерода в комплексной оценке плодородия и устойчивости почв / В.А. Романенков, Л.К. Шевцова, О.Д. Сиротенко / Методы исследования органического вещества почв. – Владимир: ВНИПТИОУ, 2005. – С. 494–509.

288. Росстат. Официальная статистика. Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство / http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/economy/#, 2017.

289. Руделев, Е.В. Минерализация – иммобилизация азота в основных типах почв и эффективность азотных удобрений: дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.04 / Евгений Викторович Руделев. – М., 1992. – 331 с.

290. Румянцев, Ф.П. Научное обоснование использования зеленого удобрения в севооборотах на серых лесных почвах Волго-Вятского экономического региона: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.01 / Румянцев Федор Полиектович. – М., 2000. – 42 с.

291. Садыков, Б.Ф. Биологическая азотфиксация в агроценозах / Б.Ф. Садыков. – Уфа: БНЦ УрО АН СССР, 1989. – 107 с.

292. Сандухадзе, Б.И. Сорт – основа сельскохозяйственного производства / Б.И. Сандухадзе // Ресурсосберегающее земледелие. – 2010. – Т.6. – №1. – С. 33.

293. Саранин, К.И. Эффективность расчетных методов доз минеральных удобрений под яровой ячмень / К.И. Саранин, В.И. Каничев // Агрохимия. – 2000. – № 11. – С. 27–33.

294. Семенов, В.А. Взаимозависимость между содержанием гумуса и другими свойствами почвы – факторами урожая / В.А. Семенов // Почвоведение. – 1992. – № 11. – С. 68–80.

295. Семенов, В.М. Действие азота удобрений на растения и почву при различных способах внесения удобрений. Сообщение 1 / В.М. Семенов, В.Н. Кудеяров, О.А.Соколов // Агрохимия. – 1981. – № 9. – С. 9–18.

296. Семенов, В.М. Иммобилизационно - мобилизационные превращения азота в серой лесной почве / В.М. Семенов, Т.Д. Кузнецова, В.Н. Кудеяров // Почвоведение. – 1995. – № 4. – С.472–479.

297. Семенов, В.М. Процессы круговорота азота в системе почва – растение и

эффективность их регулирования агрохимическими приемами: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.04 / Семенов Вячеслав Михайлович. – М., 1996. – 39 с.

298. Семенов, В.М. Слагаемые эффективности азотных удобрений в системе почва–растение и критерии их количественной оценки / В.М. Семенов // Агрохимия. – 1999. – № 5. – С. 25–33.

299. Семенов, В.М. Трансформация азота почвы и органических остатков сообществом микроорганизмов и микроскопических животных / В.М. Семенов, А.М. Семенов, А.Х. Бруггер, Ван Феррис Х, Т.В. Кузнецова // Агрохимия. – 2002. – № 1. – С. 5–11.

300. Семенов, В.М. Агроэкологические функции растительных остатков в почве / В.М. Семенов, А.К. Ходжаева // Агрохимия. – 2006. – № 7. – С. 63–81.

301. Семенов, В.М. Стабилизация органического вещества в почве / В.М. Семенов, Л.А. Иванникова, А.С. Тулина // Агрохимия. – 2009. – № 10. – С. 77–96.

302. Семенов В.М. Почвенное органическое вещество / В.М. Семенов, Б.М. Когут. – М.: ГЕОС. – 2015. – 233 с.

303. Сергалиев, Н.Х. Влияние условий азотного питания и физиологически активных веществ на формирование величины и качества урожая зерна яровой пшеницы: дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Сергалиев Нурлан Хабибуллоевич. – М., 1998. – 141 с.

304. Серегин, В.В. Использование ячменем и баланс меченого азота растительной массы бобовых культур и удобрений при применении ингибитора нитрификации на дерново-подзолистой почве: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Серегин Виталий Владимирович. – М., 2000. – 24 с.

305. Сержанов, И.М. Влияние биологических удобрений на урожайность и качество зерна яровой пшеницы в условиях северной части лесостепи / И.М. Сержанов, Ф.Ш. Шайхутдинов, С.Ш. Нуриев, И.И. Майоров // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 9. – С. 29–31.

306. Сидакова, М.С. Влияние удобрений и биопрепаратов на урожайность и качество зерна ячменя на черноземе обыкновенном: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Сидакова Маргарита Сарабиевна. – СПб., 2005. – 136 с.

307. Сиддики, М.А.Х. Влияние азотного удобрения и биопрепаратов на продуктивность ячменя в зависимости от уровня плодородия почвы: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Сиддики Мд Абдул Хай. – М., 2001. – 156 с.

308. Симаров, Б.В. Генетические основы селекции клубеньковых бактерий / Б.В. Симаров, А. А. Аронштам, Н.И. Новикова и др. – Л.: Агропромиздат, 1990. – 192 с.

309. Синих, Ю.Н. Длительное пожнивное зеленое удобрение и плодородие дерново-подзолистых почв / Ю.Н. Синих // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. – 2010 – № 2. – С. 36–42.

310. Сирота Л.Б. Несимбиотическая фиксация азота в ризосфере удобренных азотом растений / Л.Б. Сирота // Экологические последствия применения агрохимикатов (удобрения). – Пушкино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1982. – С. 37–38.

311. Смирнов, П.М. Превращение азотных удобрений в почве и их использование растениями: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: (Специальность № 533 – агрохимия) / Смирнов Петр Михайлович. – М., 1970. – 43 с.

312. Смирнов, П.М. Имобилизация азота удобрений в полевых опытах на различных почвах / П.М. Смирнов, Е.И. Шилова, Н.И. Хон // Известия ТСХА. – 1972. – № 2. – С. 85–91.

313. Смирнов, П.М. Превращение азота удобрений в почве и его использование растениями / П.М. Смирнов // Применение стабильного изотопа ^{15}N в исследованиях по земледелию. – М.: Колос, 1973. – С. 189–199.

314. Смирнов, П.М. Использование азота почвы и удобрений

сельскохозяйственными культурами / П.М. Смирнов, Н.И. Дегтярева // Известия ТСХА. – 1973. – №3. – С. 71–79.

315. *Смирнов, П.М.* Вопросы агрохимии азота (в исследованиях с ^{15}N): (Учебное пособие по агрохимии) / П.М. Смирнов. – М.: ТСХА, 1977. – 72 с.

316. *Смирнов, П.М.* Превращение меченого азота удобрений в почве в зависимости от доз и сроков их внесения / П.М. Смирнов, В.В. Кидин, О.Н. Ионова // Известия ТСХА. – 1980. – №5. – С. 65–70.

317. *Смолин, В.Ю.* Симбиотическая азотфиксация при инокуляции сои смешанными культурами диазотрофов: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Смолин Владимир Юрьевич. – М., 1996. – 20 с.

318. *Созинов, А.А.* Причины обратной зависимости между белковостью и урожайностью / А.А. Созинов, А.Н. Хохлов, Ф.А. Попереля // Перспективы селекции на белок. – Научные труды ВСГИ. – 1976. – вып. 14. – С. 3–11.

319. *Соколов, О.А.* Минеральное питание, продуктивность и качество урожая растений: на примере гречихи: дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.04. / Соколов Олег Алексеевич. – Пушкино. – 1985. – 572 с.

320. *Соколов, О.А.* Нитраты в окружающей среде / О.А.Соколов, В.М. Семенов, А. Агаев. – Пушкино: ОНТИ НЦБИ, 1990. – 316 с.

321. *Соколов, О.А.* Теория и практика рационального применения азотных удобрений / О.А.Соколов, В.М. Семенов. – М.: Наука, 1992. – 207 с.

322. *Соколов, О.А.* Методология оценки азотного питания сельскохозяйственных культур / О.А.Соколов, В.М. Семенов // Агрохимия. – 1994. – № 9. – С. 137–149.

323. *Соколов, О.А.* Показатели циклов азота и устойчивость агроэкосистем в условиях склона / О.А.Соколов, Н.Я. Шмырева // Плодородие. – 2009. – № 3. – С. 4–6.

324. *Соколов, О.А.* Потоки азота в агрофитоценозе на эродированных почвах / О.А.Соколов, А.А. Завалин, В.Г. Сычев, Н.Я. Шмырева, Л.Н. Цуриков. – М.: ВНИИА. – 2015. – 96 с.

325. *Соколов, О.А.* Направленность потоков азота в агроэкосистеме на склоне при применении органических удобрений, меченных ^{15}N / О.А. Соколов, А.А. Завалин, Н.Я. Шмырева, В.А. Черников // Плодородие. – 2015. – № 6. – С. 36–38.

326. *Соколов, О.А.* Агроэкологическая оценка потерь азота в условиях эрозийного агроландшафта (по результатам длительных исследований с ^{15}N) / О.А. Соколов, В.А. Черников, И.И. Васенев // АгроЭкоИнфо. – 2015. – № 6. – URL: <http://www.Agroecoinfo.narod.ru/>.

327. *Соколов, О.А.* Роль симбиотического азота и устойчивость его циклов при выращивании многолетних трав на склоне / О.А.Соколов, Н.Я. Шмырева, А.А. Завалин, В.А. Черников, // Плодородие. – 2016. – № 1. – С. 50–52.

328. *Соколов, О.А.* Эколого-физиологическая оценка минерального питания растений / О.А.Соколов, В.А. Черников, Н.Я. Шмырева // Известия ТСХА. – 2016. – № 3. – С. 5–17.

329. *Соколов, О.А.* Потоки азота при выращивании озимой ржи (*Secale Cereale* L.) на эродированных почвах (исследования с ^{15}N) / О.А.Соколов, Н.Я. Шмырева, А.А. Завалин // Проблемы агрохимии и экологии. – 2016. – № 3. – С. 44–47.

330. *Соколов, О.А.* Использование растениями овса азота различных доноров в агроэкосистеме / О.А. Соколов, Н.Я. Шмырева, А.А. Завалин // Российская сельскохозяйственная наука. – 2017. – № 3. – С. 29–32.

331. *Солдатова, С.С.* Роль сидерации и соломы в формировании экологически устойчивых агробиоценозов в Южно-таежной зоне: автореф. дис. ...канд. биол. наук: 03.02.08 / Солдатова Софья Сергеевна. – М., 2011. – 20 с.

332. *Сологуб, Д.Б.* Эффективность применения ризосферных диазотрофов под

зерновые в зависимости от содержания органического вещества в почве: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Сологуб Дмитрий Борисович. – М., 2005. – 22 с.

333. *Справочная книга по производству и применению органических удобрений* – Владимир: ВНИПТИОУ, 2001. – 496 с.

334. *Степанов, А.Л.* Ассоциативная азотфиксация и денитрификация в дерново-подзолистой почве при внесении минеральных удобрений: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.07 / Степанов Алексей Львович. – М., 1985. – 22 с.

335. *Стребков, И.М.* Основные закономерности взаимодействия векторов почвенного плодородия, удобрений и погоды в условиях дерново-подзолистых почв Центрального района НЧЗ РСФСР / И.М. Стребков // *Агрохимия*. – 1989. – № 2. – С. 36–41.

336. *Суров, В.В.* Продуктивность культур звена полевого севооборота при применении удобрений и микробиологических препаратов в условиях северо-запада НЗ РФ: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Суров Владимир Викторович. – М., 2015. – 142 с.

337. *Сычев В.Г.* Динамика изменения, пути воспроизводства и совершенствование методов оценки плодородия почв Европейской части территории: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.04. / Сычев Виктор Гаврилович. – М., 2000. – 48 с.

338. *Сычев, В.Г.* Роль азота в интенсификации продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Том 1. Агрохимические аспекты роли азота в продукционном процессе / В.Г. Сычев, О.А. Соколов, Н.Я. Шмырева. – М.: ВНИИА, 2009. – 423 с.

339. *Сычев, В.Г.* Методика разработки нормативов окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая сельскохозяйственных культур / В.Г. Сычев, А.А. Завалин, С.А. Шафран, В.А. Прошкин, Т.М. Духанина, Л.С. Чернова, М.П. Листова, В.А. Романенков. – М.: ВНИИА, 2009. – 48 с.

340. *Сычев, В.Г.* Концепция программы агрохимических мероприятий до 2020 года / В.Г. Сычев, Е.Н. Ефремов. Инновационные решения регулирования плодородия почв сельскохозяйственных угодий. – М.: ВНИИА, 2011. – 30 с.

341. *Сычев, В.Г.* Роль азота в интенсификации продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Том 2. Экологические аспекты роли азота в продукционном процессе / В.Г. Сычев, О.А. Соколов, А.А. Завалин, Н.Я. Шмырева. – М.: ВНИИА, 2012. – 272 с.

342. *Сычев, В.Г.* Влияние агрохимических свойств почв на эффективность минеральных удобрений / В.Г. Сычев, С.А. Шафран. – М.: ВНИИА, 2012. – 200 с.

343. *Сычев, В.Г.* Агрохимические свойства почв и эффективность минеральных удобрений / В.Г. Сычев, С.А. Шафран. – М.: ВНИИА, 2013. – 296 с.

344. *Тарасов, А.Л.* Влияние азотного удобрения и биопрепаратов на продуктивность сортов ячменя в условиях Верхневолжья: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.09 и 06.01.04 / Тарасов Алексей Леонидович. – Немчиновка, 2005. – 21 с.

345. *Тимирязев, К.А.* Сочинения. Т. 3. / К.А. Тимирязев. – М.: Сельхозгиз, 1936. – 451 с.

346. *Тихонович, И.А.* Использование генетических факторов макросимбионта для повышения эффективности биологической азотфиксации / И.А. Тихонович / Биологический азот в сельском хозяйстве СССР. – М.: Наука, 1989. – С. 166–181.

347. *Тихонович, И.А.* Биопрепараты в сельском хозяйстве. Методология и практика применения микроорганизмов в растениеводстве и кормопроизводстве / И.А. Тихонович, А.П. Кожемяков, В.К. Чеботарь, Ю.В. Круглов, Н.В. Кандыбин, Г.Ю. Лаптев. – М.: ГНУ ВНИИСХМ Россельхозакадемии, 2005. – 154 с.

348. *Тихонович, И.А.* Ризосфера как наномолекулярный интерфейс растительно-

микробных систем / И.А. Тихонович, Л.В. Кравченко, А.И. Шапошников // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2010. – № 4. – С. 19–21.

349. *Тихонович, И.А.* Сельскохозяйственная микробиология как основа экологически устойчивого агропроизводства: фундаментальные и прикладные аспекты / И.А. Тихонович, Н.А. Проворов // Сельскохозяйственная биология. – 2011 – № 3. – С. 3–9.

350. *Тихонович, И.А.* Использование биопрепаратов – дополнительный источник элементов питания растений / И.А. Тихонович, А.А. Завалин, Г.Г. Благовещенская, А.П. Кожемяков // Плодородие. – 2011. – № 3. – С. 9–13.

351. *Тихонович, И.А.* Перспективы использования азотфиксирующих и фитостимулирующих микроорганизмов для повышения эффективности агропромышленного комплекса и улучшения агроэкологической ситуации РФ / И.А. Тихонович, А.А. Завалин // Плодородие. – 2016. – № 5. – С. 28–32.

352. *Трепачев, Е.П.* Агрохимические аспекты биологического азота в современном земледелии / Е.П. Трепачев. – М.: Агроконсалт, 1999. – 532 с.

353. *Турчин, Ф.В.* Использование азотных удобрений урожаем и их превращение в почве / Ф.В. Турчин // Журнал Всесоюзного химического общества. – 1965. – Т. 10. – № 4. – С. 400–401.

354. *Турчин, Ф.В.* Азотное питание растений и применение азотных удобрений. Избранные труды / Ф.В. Турчин – М.: Колос, 1972. – 336 с.

355. *Тюлин В.В.* Подзолистые почвы на покровных суглинках восточной окраины русской равнины: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.03./ Тюлин Владимир Владимирович. – М., 1973. – 70 с.

356. *Тюрин, И.В.* Органическое вещество почвы и его роль в плодородии / И.В. Тюрин – М.: Наука, 1965. – 320 с.

357. *Удобрения, их свойства и способы использования* / под. ред. Д.А. Коренькова. – М.: Колос, 1982. – 415 с.

358. *Умаров, М.М.* Ассоциативная азотфиксация (особенности, продуктивность, значение в азотном балансе почв): автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.07 / Умаров Марат Мутагарович. – М.: МГУ, 1983. – 49 с.

359. *Умаров, М.М.* Ассоциативная азотфиксация / М.М. Умаров – М.: МГУ, 1986. – 136 с.

360. *Умаров, М.М.* Современное состояние и перспективы исследований микробной азотфиксации / М.М. Умаров / Перспективы развития почвенной биологии: Всероссийская конференция: Москва, 22.02.2001: труды / отв. ред. Д.Г. Звягинцев. – М.: Макс Пресс, 2001. – С. 47–56.

361. *Умаров, М.М.* Микробиологическая трансформация азота в современных агроценозах / М.М. Умаров / Биологические источники элементов минерального питания растений. III Сибирские агрохимические Прянишниковские чтения: материалы международной научной конференции (Омск, 12–16 июля 2005 г.) (сост. Л.Ф. Ашмарина и др.). – Новосибирск: РАСХН. Сибирское отделение, 2006. – С. 33–47.

362. *Умаров, М.М.* Микробиологическая трансформация азота в почве / М.М. Умаров, А.В. Кураков, А.Л. Степанов. – М.: ГЕОС, 2007. – 138 с.

363. *Умаров, М.М.* Азотфиксация в ассоциациях организмов / М.М. Умаров // Проблемы агрохимии и экологии. – 2009. – № 2. – С. 22–26.

364. *Феоктистова, Н.В.* Ризосферные бактерии / Н.В. Феоктистова, А.М. Марданова, Г.Ф. Хадиева, М.Р. Шарипова // Ученые записки Казанского Университета. Серия естественные науки. – 2016. – Т. 158. – кн. 2. – С. 207–224.

365. *Фрид А.С.* Система моделей плодородия почв: разработка и использование: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.03. / Фрид Александр Соломонович. – М., 1990. – 35 с.

366. Фрид, А.С. Анализ процессов сорбции и миграции веществ в почве с помощью математических моделей / А.С. Фрид // Почвоведение. – 2012. – № 9. – С. 953–961.

367. Фунг, Тхи Ми, *Agrobacterium tumefaciens* – ассоциативная азотфиксирующая бактерия / Фунг Тхи Ми, Н.А. Манучарова, А.Л. Степанов, Л.А. Поздняков, О.В. Селицкая, В.Т. Емцев // Вестник Московского университета. – Серия 17. – Почвоведение. – 2015. – №3. – С. 50–55.

368. Фурина, Е.К. Влияние совместной и раздельной инокуляции растений люцерны культурами *Azospirillum lipoferum* и *Sinorhizobium meliloti* на активность процессов денитрификации и азотфиксации / Е.К. Фурина, Г.А. Бонарцева // Прикладная биохимия и микробиология. – 2007. – Т. 43. – № 3. – С. 318–324.

369. Хворова, Л.А. Математическая модель симбиотической азотфиксации / Л.А. Хворова, А.Г. Топаж, А.В. Абрамова // Известия Алтайского государственного университета. – 2015. – № 1. – С. 158–163.

370. Хлесткина, Е.К. Реализация генетического потенциала сортов мягкой пшеницы под влиянием условий внешней среды: современные возможности улучшения качества зерна и хлебопекарной продукции (обзор) / Е.К. Хлесткина, Е.В. Журавлева, Т.А. Пшеничникова, Н.И. Усенко, Е.В. Морозова, С.В. Осипова, М.Д. Пермьякова, Д.А. Афонников, Ю.С. Отмахова // Сельскохозяйственная биология. – 2017. Т. 52. – № 3. – С. 501–514.

371. Хусайнов, Х.А. Азотное питание и продуктивность сортов ячменя при использовании биопрепаратов: дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Хусайнов Харон Адамович. – М., 2006. – 166 с.

372. Цыбулько, Н.Н. Азотный фонд дерново-подзолистых почв различной степени эродированности и потери азота в процессе водной эрозии / Н.Н. Цыбулько, А.Ф. Черныш, И.И. Жукова, С.С. Пунченко // Агрехимия. – 2013. – № 2. – С. 3–10.

373. Цыганков, А.А. Азотфиксирующие цианобактерии – продуценты водорода (обзор) / А.А. Цыганков // Прикладная биохимия и микробиология. – 2007. – Т. 43. – № 3. – С. 279–288.

374. Чан, Х.Х. Баланс меченого ^{15}N азота удобрений в зависимости от доз и сроков их внесения в условиях лизиметрического опыта: дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Чан Хкак Хиен. – М., 1984. – 132 с.

375. Чеботарь, В.К. Антифунгальные и фитостимулирующие свойства ризоферного штамма *Bacillus subtilis* Ч-13 – продуцента биопрепаратов / В.К. Чеботарь, Н.М. Макарова, А.И. Шапошников, Л.В. Кравченко // Прикладная биохимия и микробиология. – 2009. – Т.45. – № 4. – С. 465–469.

376. Чеботарь, В.К. Применение биомодифицированных минеральных удобрений / В.К. Чеботарь, А.А. Завалин, А.Г. Ариткин. – М.: ВНИИА; Ульяновск: УлГУ, 2014. – 142 с.

377. Чеботарь, В.К. Эндوفитные бактерии в микробных препаратах, улучшающих развитие растений (обзор) / В.К. Чеботарь, Н.В. Мальфанова, А.В. Щербаков, Г.А. Ахтемова, А.Ю. Борисов, Б. Люгтенберг, И.А. Тихонович // Прикладная биохимия и микробиология. – 2015. – Т.51. – № 3. – С. 283–289.

378. Чеботарь, В.К. Эндوفитные бактерии древесных растений как основа комплексных микробных препаратов для сельского и лесного хозяйства / В.К. Чеботарь, А.В. Щербаков, Е.Н. Щербакова, С.Н. Масленникова, А.Н. Заплаткин, Н.В. Мальфанова // Сельскохозяйственная биология. – 2015. – Т.50. – № 5. – С. 648–654.

379. Чеботарь, В.К. Микробные препараты на основе эндوفитных и ризобактерий, которые перспективны для повышения продуктивности и эффективности использования минеральных удобрений у ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) и овощных культур / В.К. Чеботарь, А.Н. Заплаткин, А.В. Щербаков,

Н.В. Мальфанова, А.А. Старцева, Я.В. Костин // Сельскохозяйственная биология. – 2016. – Т.51. – № 3. – С. 335–342.

380. *Чеботарь, В.К.* Эндофитные бактерии древесных растений как основа комплексных микробных препаратов для сельского и лесного хозяйства / В.К. Чеботарь, А.В. Щербаков, С.Н. Масленникова, А.Н. Заплаткин, А.В. Канарский, А.А. Завалин // Российская сельскохозяйственная наука. – 2016. – № 4. – С. 40–44.

381. *Черепков, Н.И.* Круговорот биологического азота в сельском хозяйстве СССР / Н.И. Черепков / Минеральный и биологический азот в земледелии СССР (отв. ред. Е.Н. Мишустин). – М.: Наука. – 1985. – 272 с.

382. *Черников, В.А.* Агроэкология / В.А. Черников, А.И. Чекерес, Р.М. Алексин, А.В. Голубев. – М.: Колос, 2000. – 536 с.

383. *Чистотин, М.В.* Эффективность инокуляции яровой пшеницы *agrobacterium radiobacter* в зависимости от удобрений, почвенных и метеорологических условий: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.04 / Чистотин Максим Викторович. – М., 2001. – 20 с.

384. *Чуб, М.П.* Оптимизация минерального питания культур и система удобрений в севооборотах на черноземах и темно-каштановых почвах засушливого Поволжья: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.03. / Чуб Майя Павловна. – М., 1989. – 48 с.

385. *Шабаев, В.П.* Роль биологического азота в системе «почва–растение» при внесении ризосферных микроорганизмов: дис. ... докт. биол. наук: 06.01.04./ Шабаев Валерий Павлович – Пушино, 2004. – 277 с.

386. *Шабаев, В.П.* Оптимизация минерального питания зерновых культур и ярового рапса инокуляцией ризосферными бактериями, стимулирующими рост растений / В.П. Шабаев // Агрехимия. – 2011. – № 9. – С. 29–42.

387. *Шабаев, В.П.* Минеральное питание растений при инокуляции ростстимулирующими ризосферными бактериями рода *Pseudomonas* / В.П. Шабаев // Успехи современной биологии. – 2012. – т. 132. – № 3. – С. 268–281.

388. *Шакиров, В.И.* Зависимость величины и химического состава урожая ярового ячменя от совместного применения макроудобрений и биопрепарата Ризоагрин / В.И. Шакиров, М.Ю. Гилязов // Агрехимический вестник. – 2010. – № 4. – С. 26–27.

389. *Шаркова, С.Ю.* Экологические аспекты известкования и инокуляции яровой пшеницы Ризоагрином на серой лесной почве лесостепи Среднего Поволжья: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / Шаркова Сания Юнусовна. – Казань, 2004. – 19 с.

390. *Шапошников, А.И.* Взаимодействие ризосферных бактерий с растениями: механизмы образования и факторы эффективности ассоциативных симбиозов (обзор) / А.И. Шапошников, А.А. Белимов, Л.В. Кравченко, Д.М. Виванко // Сельскохозяйственная микробиология. – 2011 – № 3. – С. 16–22.

391. *Шатилов, И.С.* Принципы программирования урожайности / И.С. Шатилов // Вестник сельскохозяйственной науки – 1973. – № 3. – С. 8–14.

392. *Шатилов И.С.* Баланс азота в севообороте на дерново-подзолистой почве / И.С. Шатилов, А.Г. Замараев, Г.В. Чаповская // Известия ТСХА. – 1977. – № 1. – С. 34–44.

393. *Шатилов, И.С.* Математические модели минерального питания озимой пшеницы / И.С. Шатилов, А.Г. Замараев, Н.А. Полев, А.Д. Силян, Г.В. Чаповская, А.Ф. Шаров // Известия ТСХА. – 1987. – № 3. – С. 3–10.

394. *Шатилов, И.С.* Программирование урожайности полевых культур и динамика воспроизводства гумуса в дерново-подзолистой почве / И.С. Шатилов, А.Г. Замараев, Г.В. Чаповская, Н.А. Полев, А.Д. Силян // Известия ТСХА. – 1990. – № 6. – С. 3–16.

395. *Шатилов, И.С.* Математические модели процессов фотосинтетической деятельности и минерального питания овса / И.С. Шатилов, А.Д. Силин, А.Ф. Шаров, Н.А. Полев, В.В. Юрашев // Известия ТСХА. – 1996. – № 3. – С. 3–15.
396. *Шатилов, И.С.* Моделирование агрохимического состояния плодородия почвы и питания растений / И.С. Шатилов, А.Д. Силин, Н.А. Полев // Химия в сельском хозяйстве. – 1996. – № 5. – С. 13–15.
397. *Шатилов, И.С.* Математические модели процессов фотосинтетической деятельности и минерального питания картофеля / И.С. Шатилов, В.В. Полетаев, Н.А. Полев, В.В. Юрашев // Известия ТСХА. – 1997. – № 3. – С. 22–36.
398. *Шафран, С.А.* Оптимизация азотного питания зерновых культур при разной обеспеченности дерново-подзолистых почв фосфором и калием: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.04 / Шафран Станислав Аронович. – М., 1995. – 51 с.
399. *Шафран, С.А.* Эффективность азотных удобрений в зависимости от обеспеченности дерново-подзолистых почв подвижными формами фосфора и калия / С.А. Шафран // Агрохимия. – 1995б. – № 11. – С. 51–57.
400. *Шафран, С.А.* Влияние агрохимических свойств почв Центрального района на урожайность зерновых культур / С.А. Шафран, В.А. Прошкин // Агрохимия. – 2008. – № 7. – С. 1–9.
401. *Шафран, С.А.* Влияние агрохимических свойств почв на окупаемость азотных удобрений / С.А. Шафран, В.А. Прошкин, Г.И. Ваулина, Е.С. Козеичева // Агрохимия. – 2010. – № 8. – С. 15–23.
402. *Шафран, С.А.* Окупаемость калийных удобрений прибавкой урожая зерновых культур на почвах России / С.А. Шафран, В.А. Прошкин, Т.М. Духанина // Агрохимия. – 2012. – № 12. – С. 31–40.
403. *Шафран, С.А.* Азотное питание / С.А. Шафран, В.Г. Сычев, А.А. Кондрашов. – М.: ОАО МХК «ЕвроХим», 2013. – 80 с.
404. *Шафран, С.А.* Развитие исследований по диагностике минерального питания растений (обзор публикаций в журнале «Агрохимия» за 50 лет) / С.А. Шафран // Агрохимия. – 2014. – № 3. – С. 3–11.
405. *Шафран, С.А.* Влияние типа почв и содержания в них подвижных фосфатов на эффективность фосфорных удобрений / С.А. Шафран // Агрохимия. – 2015. – № 3. – С. 26–33.
406. *Шафран, С.А.* Продуктивность ярового ячменя и окупаемость азотных удобрений в зависимости от содержания элементов питания в основных типах почв России / С.А. Шафран, Е.С. Козеичева // Агрохимия. – 2016. – № 3. – С. 11–22.
407. *Шафран, С.А.* Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны и ее резервы / С.А. Шафран // Агрохимия. – 2016. – № 8. – С. 3–10.
408. *Шафран, С.А.* Значение комплексного агрохимического окультуривания почв в повышении эффективности применения азотных удобрений под пшеницу / С.А. Шафран, Т.М. Духанина // Агрохимия. – 2017. – № 11. – С. 21–30.
409. *Шевцова, Л.К.* Гумусное состояние и азотный фонд основных типов почв при длительном применении удобрений: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.04. / Шевцова Людмила Константиновна – М., 1988. – 49 с.
410. *Щербаков, А.В.* Эндобитные бактерии сфагновых мхов как перспективные объекты сельскохозяйственной микробиологии / А.В. Щербаков, А.В. Брагина, Е.Ю. Кузьмина, К. Берг, А.Н. Мунтян, Н.М. Макарова, Н.В. Мальфанова, М. Кардинале, Г. Берг, В.К. Чеботарь, И.А. Тихонович // Микробиология. – 2013. – Т. 82. – № 3. – С.312–322.
411. *Щербаков, А.В.* Эндобитные бактерии, населяющие семена пшеницы, перспективные продуценты микробных препаратов для сельского хозяйства / А.В. Щербаков, А.Н. Заплаткин, В.К. Чеботарь // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 7. – С.35–38.

412. Шишов, Л.Л. Критерии и модели плодородия почв / Л.Л. Шишов, И.И. Карманов, Д.Н. Дурманов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 184 с.

413. Шильникова, В.К. Микроорганизмы-азотонакопители на службе растений / В.К. Шильникова, Е.Я. Серова. – М.: Наука, 1983. – 149 с.

414. Шкотова, О.Н. Эффективность микробно-растительных взаимодействий, минерального азота в одновидовых и смешанных посевах в условиях серых лесных почв Нечерноземья РФ: автореферат дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.01 / Шкотова Оксана Николаевна. – Брянск, 2016. – 23 с.

415. Шмырева, Н.Я. Участие азота многолетних трав в формировании органического вещества дерново-подзолистой почвы / Н.Я.Шмырева, О.А.Соколов, Л.Н. Цуриков // Плодородие. – 2012. – № 6. – С. 25–27.

416. Шмырева, Н.Я. Особенности ассимиляции микроорганизмами азота фитомассы многолетних трав в почве разной степени эродированности / Н.Я.Шмырева, О.А.Соколов, А.А. Завалин // Доклады Россельхозакадемии. – 2014. – № 3. – С. 35–38.

417. Шмырева, Н.Я. Баланс азота при выращивании многолетних бобово-злаковых трав на склоне (II ротация с ^{15}N) / Н.Я.Шмырева, О.А.Соколов, А.А. Завалин, В.А. Черников // Плодородие. – 2016. – № 2. – С. 43–45.

418. Шмырева, Н.Я. Использование азота удобрений ячменем при различных способах внесения азотного удобрения в условиях эрозионного ландшафта (II ротация с ^{15}N) / Н.Я.Шмырева, О.А.Соколов, А.А. Завалин, В.А. Литвинский // Плодородие. – 2017. – № 1. – С. 54–56.

419. Шмырева, Н.Я. Потоки азота в эрозионном агроландшафте при выращивании овса в третьей ротации севооборота (исследования с использованием ^{15}N) / Н.Я.Шмырева, О.А.Соколов, А.А. Завалин // Плодородие. – 2017. – № 4. – С. 50–52.

420. Шотт, П.Р. Биологическая фиксация азота в однолетних агроценозах лесостепной зоны Западной Сибири: дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.04. / Шотт Петр Рейнгольдович. – Барнаул, 2007. – 287 с.

421. Шпаар, Д. Зерновые культуры / Д. Шпаар, Ф. Элмер, А. Постников, Н. Протасов, и др. – Минск: «ФУАинформ», 2000. – 421 с.

422. Штырхунов, В.Д. Яровой ячмень. Технология возделывания в Центральном районе Нечерноземной зоны РФ / В.Д. Штырхунов, А.В. Останина, П.М. Политько и др. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2010. – 142 с.

423. Шумный, В.К. Биологическая фиксация азота / отв. ред. В.К. Шумный, К.К. Сидорова, И.Л. Клевенская. – АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т цитологии и генетики. – Новосибирск. Наука, 1991. – 271 с.

424. Эзрохин, Л.М. Селекция яровой пшеницы в условиях Центральных районов Нечерноземной зоны РФ: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук в форме научного доклада: 06.01.05 / Эзрохин Людвиг Михайлович. – Немчиновка, Московская обл., 1994. – 56 с.

425. Ягодина, М.С. Интенсивность несимбиотической фиксации атмосферного азота при различных сочетаниях органического вещества, влажности и температуры / М.С. Ягодина, Б.А. Ягодин, Е.Л. Веревкин // Известия ТСХА. – 1979. – № 2. – С. 71–77.

426. Abeysingha, N.S. A preliminary study on quantification of biological nitrogen fixation in sugarcane grown in Sevanagala in Sri Lanka / N.S. Abeysingha, C.S. Weerarathne // Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka. – 2010. – V. 38. – № 3. – P. 207–210.

427. Accoe, F. Gross N transformation rates and net N mineralisation rates related to the C and N contents of soil organic matter fraction in grassland soils of different age

/ F. Accoe, P. Boeckx, J. Busschaert, G. Horman, O. Van Cleemput // Soil Biology and Biochemistry. – 2004. – V. 36. – № 12. – P. 2075–2087.

428. *Aulakh, M.S.* Mineralization and denitrification in upland, nearly saturated and flooded subtropical soil II. Effect of organic manures varying in N content and C:N ratio / M.S. Aulakh, T.S. Khera, J.W. Doran // Biology and Fertility of Soils. – 2000. – V. 31. – № 2. – P. 168–174.

429. *Azevedo, J.L.* Endophytic microorganisms: a review on insect control and recent advances on tropical plants / J.L. Azevedo, J.Jr. Maccheroni, O. Pereira, W.L. Ara // Electronic Journal of Biotechnology. – 2000. – V. 3. – P. 40–65.

430. *Baldani, V.L.D.* Identification and ecology of *Herbaspirillum seropedicae* and the closely related *Pseudomonas rubrisubalbicans* / V.L.D. Baldani, J.I. Baldani, F.L. Olivares, J. Döbereiner // Symbiosis. – 1992. – V. 13. – P. 65–73.

431. *Barradough, E.* Tabе of fertilizer nitrogen applied to grassland. II. Nitrogen -15-leaching results / E. Barradough, E. Geens, J.M. Maggs // Soil Science. – 1984. – V. 35. – № 2. – P. 191–199.

432. *Barraclough, D.* The direct or MIT route for nitrogen immobilization: a ¹⁵N mirror image study with leucine and glycine / D. Barraclough // Soil Biology and Biochemistry. – 1997. – V. 29. – № 1. – P. 101–108.

433. *Barraquio, W.L.* Isolation of endophytic diazotrophic bacteria from wetland rice / W.L. Barraquio, L. Revilla, J.K. Ladha // Plant and Soil. – 1997. – V. 194. – P. 15–24.

434. *Bashan, Y.* Proposal for the division of plant growth-promoting rhizobacteria into two classifications: biocontrol-PGPB (plant growth-promoting bacteria) and PGPB / Y. Bashan, G. Holguin // Soil biology and biochemistry. – 1998. – V. 30. – № 8/9. – P. 1225–1228.

435. *Bashan, Y.* Azospirillum-plant relationships: physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997–2003) / Y. Bashan, G. Holguin, L.E. de-Bashan // Canadian Journal of Microbiology. – 2004. – V. 50. – № 8. – P. 521–577.

436. *Bhattacharjee, R.B.* Use of nitrogen-fixing bacteria as biofertiliser for non-legumes: prospects and challenges. / R.B. Bhattacharjee, A. Singh, S.N. Mukhopadhyay // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2008. – V. 80. – № 2. P. 199–209.

437. *Bjarnasson, S.* Immobilization and mineralization of ammonium and nitrate after addition of different energy sources to soil / S. Bjarnasson // Plant and Soil. – 1987. – № 3. – P. 381–389.

438. *Blankenau, K.* Effect of microbial nitrogen immobilization during the growth period on the availability of nitrogen fertilizer for winter cereals / K. Blankenau, H.-W. Olf, H. Kuhlmann // Biology and Fertility of Soils. – 2000. – V. 32. – № 2. – P. 157–165.

439. *Boddey, R.M.* Use of the ¹⁵N natural abundance technique to quantify biological nitrogen fixation by woody perennials / R.M. Boddey, M.B. Peoples, B. Palmer, P.J. Dart // Nutrient Cycling in Agroecosystems. – 2000. – V. 57. – № 3. – P. 235–270.

440. *Bremer, E.* Evidence against associative N₂ fixation as a significant N source in long-term wheat plots / E. Bremer, H.H. Janzen, C. Gilbertson // Plant and Soil. – 1995. – V. 175. – № 1. – P. 13–19.

441. *Burger, M.* Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems / M. Burger, L. E. Jackson // Soil Biology and Biochemistry. – 2003. – V. 35. – № 1. – P. 29–36.

442. *Chalk, P.M.* Characterization of the N benefit of a grain legume (*Lupinus angustifolius* L.) to a cereal (*Hordeum vulgare* L.) by an in situ ¹⁵N isotope dilution technique / P.M. Chalk, C.J. Smith, S.D. Hamilton, P. Hopmans // Biology and Fertility of Soils. – 1993. – V. 15. – p. 39–44.

443. *Compant, S.* Endophytes of Grapevine Flowers, Berries, and Seeds: Identification

of Cultivable Bacteria, Comparison with Other Plant Parts, and Visualization of Niches of Colonization / S. Compant, B. Mitter, J. G. Colli-Mull, H. Gangl, A. Sessitsch // *Microbial Ecology*. – 2011. – V. 62. – № 1. – P. 188–197.

444. *Dakora, F.D.* Contribution of legume nitrogen fixation to sustainable agriculture in Sub-Saharan Africa / F.D. Dakora, S.O. Keya // *Soil Biology and Biochemistry*. – 1997. – №29. – P. 809–817.

445. *Dobbelaere, S.* Responses of agronomically important crops to inoculation with *Azospirillum* / S. Dobbelaere, A. Croonenborghs, A. Thys et al. // *Australian Journal of Plant Physiology*. – 2001. – V. 28. – № 9. – P. 871–879.

446. *Dobbelaere, S.* Effect of inoculation with wild type *Azospirillum brasilense* and *A. irakense* strains on development and nitrogen uptake of spring wheat and grain maize / S. Dobbelaere, A. Croonenborghs, A. Thys, D. Ptacek, Y. Okon, J. Vanderleyden // *Biology and Fertility of Soils*. – 2002. – V. 36. – pp 284–297.

447. *Döbereiner, J.* Endophytic Diazotrophs in Sugar Cane, Cereals and Tuber Plants / J. Döbereiner, V.M. Reis, M.A. Paula, F. Olivares / *New Horizons in Nitrogen Fixation*. – 1993. – P. 671–676.

448. *Ehsani, M.R.* A NIR Technique for Rapid Determination of Soil Mineral Nitrogen / M.R. Ehsani, S.K. Upadhyaya, D. Slaughter, S. Shafii, M. Pelletier // *Precision Agriculture*. – 1999. – V. 1. – P. 219–236.

449. *Fallik, E.* Growth response of maize roots to *Azospirillum* inoculation: effect of soil organic matter content, number of rhizosphere bacteria and timing of inoculation / E. Fallik, Y. Okon // *Soil Biology and Biochemistry* – 1988. – V. 20. – P. 45–49.

450. *Fallik, E.* Inoculants of *Azospirillum brasilense*: Biomass production, survival and growth promotion of *Setaria italic* and *Zea mays* / E. Fallik, Y. Okon // *Soil Biology and Biochemistry*. – 1996 (a). – V. 28. – № 1. – P. 123–126.

451. *Fallik, E.* The response of maize (*Zea mays*) to *Azospirillum* inoculation in various types of soils in the field / E. Fallik, Y. Okon // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 1996 (6). – Vol. 12. – № 5. – P. 511–515.

452. *Follet, R.* Innovative ¹⁵N micro plot research techniques to study nitrogen use efficiency under different ecosystems / R. Follet // *Commun. Soil Science and Plant Anal.* – 2001. – V. 32. – № 7-8. – P.951–979.

453. *Franche, C.* Nitrogen-fixing bacteria associated with leguminous and non-leguminous plants / C. Franche, K. Lindström, C. Elmerich // *Plant Soil*. – 2009. – V. 321. – P. 35–59.

454. *Fried, M.* Concerning the measurement of available soil nutrients / M. Fried, L. Dean // *Soil Science*. – 1952. – V. 73. – № 4. – P. 263–271.

455. *Galal, Y.G.M.* Non-isotopic method for the quantification of biological nitrogen fixation and wheat production under field conditions / Y.G.M. Galal, I.A. El-Ghandour, S.S. Aly, S. Soliman, A. Gadalla // *Biology and Fertility of Soils*. – 2000. – V. 32. – № 1. – P. 47–51.

456. *Galal, Y.G.M.* Stimulation of wheat growth and N fixation through *Azospirillum* and *Rhizobium* inoculation: A field trial with ¹⁵N techniques / Y.G.M. Galal, I.A. El-Ghandour, E.A. El-Ael / In book *Plant Nutrition* / W.J. Horst, M.K. Schenk et al. – 2001. – P. 666–667.

457. *Giller, K.E.* A method for measuring the transfer of fixed nitrogen from free-living bacteria to higher plants using ¹⁵N₂ / K.E. Giller, J.M. Day, P.J. Darth, S.P. Wanib // *Journal of Microbiological Methods*. – 1984. – V. 2. – P. 307–316.

458. *Glendining, M.J.* Availability of the residual nitrogen from a single application of ¹⁵N-labelled fertilizer to subsequent crops in a long-term continuous barley experiment / M.J. Glendining, P.R. Poulton, D.S. Powlson, A.J. Macdonald, D.S. Jenkinson // *Plant and Soil*. – 2001. – V. 233. – № 2. – P 231–239.

459. Hart, P.B.S. Influence of pool substitution on the interpretation of fertilizer experiments with 15N / P.B.S. Hart, J.H. Rayner, D.S. Jenkinson // Soil Science. – 1986. – V. 37. – № 3. – P.389–403.
460. Hurek, T. Azoarcus grass endophytes contribute fixed nitrogen to the plant in an unculturable state / T. Hurek, L.L. Handley, B. Reinhold - Hurek // Molecular Plant-Microbe Interact. – 2002. – V. 15. – № 3. – P. 233–242.
461. Holguin, G. Genetics and molecular biology of Azospirillum / G. Holguin, C.L. Patten, B.R. Glick // Biol Fertil Soils. – 1999. – V.29. – P. 10–23.
462. Ibewiro, B. Transformations and recovery of residue and fertilizer nitrogen-15 in a sandy Lixisol of West Africa / B. Ibewiro, N. Sanginga, B. Vanlauwe, R. Merckx // Biology and Fertility of Soils. – 2000. – V. 31. – №3-4. – P. 261–269.
463. Ilyas, N. Azospirillum strains isolated from roots and rhizosphere soil of wheat (*Triticum aestivum* L.) grown under different soil moisture conditions / N.Ilyas, A. Bano // Biology and Fertility of Soils. – 2010. – V. 46. – P. 393–406.
464. Iniguez, A.L. Nitrogen Fixation in Wheat Provided by *Klebsiella pneumoniae* 342 / A.L. Iniguez, Y. Dong, E.W. Triplett // Molecular Plant-Microbe Interactions. – 2004. – V.17. – №10. – P. 1078–1085.
465. Isobe, K. Ecological perspectives on microbes involved in N-cycling / K. Isobe, N. Ohte // Microbes and Environments. – 2014. – V. 29. – № 1. – P. 4–16.
466. Ichir, L.L. Recovery of 15N labeled wheat residue and residual effects of N fertilization in a wheat-wheat cropping system under Mediterranean conditions / L.L. Ichir, M. Ismaili, G. Hofman // Nutrient Cycling in Agroecosystem. – 2003. – V. 66. – № 2. – P. 201–207.
467. Jain, D.K. Root hair deformation, bacterial attachment and plant growth in wheat. Azospirillum associations / D.K. Jain, D. Patriquin // Applied and Environmental Microbiology – 1984. – V.48. – №2. – P. 1208–1213.
468. Jain, D.K. Characterization of a substance produced by Azospirillum which causes branching of wheat root hairs / D.K. Jain, D. Patriquin // Canadian Journal of Microbiology – 1985. – V. 31. – №3. – P. 206–210.
469. Janzen, H.H. The fate of nitrogen in agroecosystems: An illustration using Canadian estimates / H.H. Janzen, K.A. Beauchemin, Y. Bruinsma, C.A. Campbell, R.L. Desjardins, B.H. Ellert, E.G. Smith // Nutrient Cycling in Agroecosystems. – 2003. – V.67. – № 1. – P.85–102.
470. Jensen, E.S. Mineralization - immobilization of nitrogen in soil amended with low C : N ratio plant residues with different particle sizes / E.S. Jensen // Soil Biology and Biochemistry. – 1994a. – V. 26. – № 3. – P.519–521.
471. Jensen, E.S. Dynamics of mature pea residue nitrogen turnover in unplanted soil under field conditions / E.S. Jensen // Soil Biology and Biochemistry. – 1994b. – V. 26. – № 4. – P. 455–464.
472. Jensen, B. Availability of Nitrogen in 15N-Labeled Ruminant Manure Components to Successively Grown Crops/ B. Jensen, P. Sorensen, I.K. Thomsen, B.T. Christensen, E.S. Jensen // Soil Science Society of America. – 1999. – V. 63. – № 2. – P. 416–423.
473. Kahindi, J.H.P. Agricultural intensification, soil biodiversity and ecosystem function in the tropics: the role of nitrogen-fixing bacteria / J.H.P. Kahindi, P. Woome, T. George, F.M. de Souza Moreira, N.K. Karanja, K.E. Giller // Applied Soil Ecology. – 1997. – V. 6. – P. 55–46.
474. Keyser, H. Potential for increasing biological nitrogen fixation in soybean / H. Keyser, L. Fudi // Plant and Soil. – 1992. – V. 141. – №2. – P. 119–135.
475. Kirizii, D.A. Relationships between nitrogen fixation and photosynthesis as the main components of the productivity in alfalfa / D.A. Kirizii, N.A. Vorobei, S.Ya Kots // Russian Journal of Plant Physiology. – 2007. – V. 54. – № 5. – P. 589–594.

476. *Korsaeth, A.* Temporal changes in mineralization and immobilization of N during degradation of plant material: implications for the plant N supply and nitrogen losses / A. Korsaeth, T.M. Henriksen, L.R. Bakken // *Soil Biology and Biochemistry.* – 2002. – V. 34. – № 6. – P.789–799.

477. *Li, F.* Fate of nitrogen from green manure, straw, and fertilizer applied to wheat under different summer fallow management strategies in dryland / F. Li, Z. Wang, J. Dai, Q. Li, X. Wang, C. Xue, H. Liu, G. He // *Biology and Fertility of Soils.* – 2015. – V. 51. – № 7. – P.769–780.

478. *Lindberg, T.* Distribution of ^{15}N in the soil-plant system during a four-year field lysimeter study with barley (*Hordeum distichum*L.) and perennial meadow fescue (*Festuca pratensis* Huds.) / T.Lindberg, T.A. Bonde, L. Bergström, R. Pettersson, T. Rosswall, J. Schnürer // *Plant and Soil.* – 1989. – V. 119. – № 1. – P. 25–37.

479. *Loshakov, V.G.* The Green Manure as a Factor of Agriculture Biologization and Nature-Similar Agrotechnology / V.G. Loshakov // *Biogeosystem Technique.* – 2015. – V. 6. – № 4. – P. 374–392.

480. *Malfanova, N.* Characterization of *Bacillus subtilis* HC8, a novel plant-beneficial endophytic strain from giant hogweed / N. Malfanova, F. Kamilova, S. Validov, A. Shcherbakov, V. Chebotar, I. Tikhonovich, B. Lugtenberg // *Microbial Biotechnology.* – 2011. – № 4. – P. 523–532.

481. *Mallory, E.B.* Seasonal nitrogen availability from current and past applications of manure / E.B. Mallory, T.S. Griffin, G.A. Porter // *Nutrient Cycling in Agroecosystems.* – 2010. – V.88. – № 3. – P.351–360.

482. *Matzel, W.* N application to winter wheat at tillering and shooting: N balance at different growth stages / W. Matzel, H. Lippold // *Fertilizer research.* – 1990. – V. 26. – P. 139–144.

483. *Manzoni, S.* Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales / S. Manzoni, A. Porporato // *Soil Biology and Biochemistry.* – 2009. – № 41. – P. 1355–1379.

484. *Mazzola, M.* Wheat Cultivar-Specific Selection of 2,4-Diacetylphloroglucinol-Producing Fluorescent *Pseudomonas* Species from Resident Soil Populations / M. Mazzola, D.L. Funnell, J.M. Raaijmakers // *Microbial Ecology.* – 2004. – V.48. – № 3. P. 338–348.

485. *Mertens, T.* Yield increases in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) inoculated with *Azospirillum lipoferum* under greenhouse and field conditions of a temperate region / T. Mertens, D. Hess // *Plant and Soil.* – 1984. – V. 82. – №1. – P. 87–99.

486. *Mitovska, R.* Effect of organic matter on nitrogen transformation in soil (in compliance with ^{15}N experiments) / R. Mitovska // *Trans. 13 Congr. Int. Soc. Soil Sci. – Hamburg, 13-20 Aug, 1986. – Hamburg. – 1986. – V. 2. – P. 398–405.*

487. *Molla, A.* Mechanism of root growth and promotion of nodulation in vegetable soybean by *Azospirillum brasilense* / A. Molla, Z. Shamsuddin, H. Saud // *Communication in Soil Science and Plant Analysis.* – 2001. – V. 32. – № 13-14. –P. 2177–2187.

488. *Oik, D.C.* A chemical fractionation for structure - function relations of soil organic matter in nutrient cycling / D.C. Oik // *Soil Science Society of America Journal.* – 2006. – V. 70. – P. 1013–1022.

489. *O'kon, Y.* The development of *Azospirillum* as a commercial inoculant for improving crop yields / Y. O'kon, R. Inzigsohn // *Biotechnology Advances.* – 1995. – V.13 – № 3. – P. 415–424.

490. *Olson, R.V.* Effects of field fertilizer practices on labeled ammonium-nitrogen transformations and its utilization by winter wheat / R.V. Olson // *Plant and Soil.* – 1987. – V. 97. – №2. – P. 189–200.

491. *Patra, D.D.* Forms of fertilizer nitrogen residues in soil after intercropping of

maize-cowpea / D.D. Patra, M.S. Sachdev, B.V. Subbi // *Biology and Fertility of Soils*. – 1987. – V. 4. – № 3. – P. 155–161.

492. *Patel, J.K.* Diverse culturable diazotrophic endophytic bacteria from Poaceae plants show cross-colonization and plant growth promotion in wheat / J.K. Patel, G. Archana // *Plant and Soil*. – 2017. – V.417. – № 1-2. P. 99–116.

493. *Paul, E.A.* Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems / E.A. Paul // *Intern. Symp. Brisbane (Austral)* ed. Willson. J. R. – 1988. – V.1. – P. 417.

494. *Plazinski, J.* Plasmid Visualization and nif Gene Location in Nitrogen-Fixing Azospirillum Strains / J. Plazinski, P.J. Dart, B.G. Rolfe // *Journal of bacteriology*. – 1983. – V. 155. – № 3. – P. 1429–1433.

495. *Powlson, D.S., Jenkinson D.S.* Non-fertilizer inputs of nitrogen to arable and grassland systems / D.S. Powlson, D.S. Jenkinson // *Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems: Intern. Symp. Brisbane (Austral.)*. – 1987. – P. 59–61.

496. *Puri, G.* Microbial immobilization of ^{15}N - labeled ammonium and nitrate in a temperate woodland soil / G. Puri, M.R. Asham // *Soil Biology and Biochemistry*. – 1999. – V. 31. – № 6. – P. 929–931.

497. *Redin, M.* How the chemical composition and heterogeneity of crop residue mixtures decomposing at the soil surface affects C and N mineralization / M. Redin, S. Recous, C. Aita, G. Dietrich, A.C. Skolaude, W.H. Ludke, R.Schmatz, S.J.Giacomini // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2014. – V. 78. – P. 65–75

498. *Reinhold-Hurek, B.* Azoarcus spp. and their interactions with grass roots / B. Reinhold-Hurek, T. Hurek // *Plant and Soil*. – 1997. – V. 194. – № 1-2. – P. 57–64.

499. *Regehr, A.* Gross nitrogen mineralization and immobilization in temperate maize-soybean intercrops / A. Regehr, M. Oelbermann, C. Videla, L. Echarte // *Plant and Soil*. – 2015. – V. 391. – № 1-2. – P. 353–365.

500. *Rennie R.J.* Dinitrogen-fixing bacteria: computer-assisted identification of soil isolates / R.J. Rennie // *Canadian Journal of Microbiology*. – 1980. – V.26. – № 11. – P. 1275–1283.

501. *Rothballer, M.* Diazotrophic Bacterial Endophytes in Gramineae and Other Plants / M. Rothballer, M. Schmid, A. Hartmann // *Microbiology Monographs*. – 2009. – V. 8. – P. 273–302.

502. *Ruby, E. J.* A Review: Bacterial endophytes and their bioprospecting / E. J. Ruby, T.M. Raghunath // *Journal of Pharmacy Research*. – 2011. – V. 4. – № 3. – P. 795–799.

503. *Ryan, R.P.* Bacterial endophytes: recent developments and applications / R.P. Ryan, K. Germaine, A. Franks, D.J. Ryan, D.N. Dowling // *FEMS Microbiol. Lett.* – 2008. – V. 278. – P. 1–9.

504. *Silveira, A.P.D.* Nitrogen metabolism and growth of wheat plant under diazotrophic endophytic bacteria inoculation / A.P.D. Silveira, V.M.R. Sala, E.J.B.N. Cardoso, E.G. Labanca, M.A. P. Cipriano // *Applied Soil Ecology*. – 2016. – V.107. – P. 313–319.

505. *Schulz, B.* What are endophytes? / B. Schulz, C.J.C. Boyle, T.N. Sieber (Ed.) // *Microbial Root Endophytes*. Berlin: Springer-Verlag. – 2006. – P. 191–206.

506. *Skonieski, F.R.* Effect of seed inoculation with *Azospirillum brasilense* and nitrogen fertilization rates on maize plant yield and silage quality / F.R. Skonieski, J. Viégas, T.N. Martin, J.L. Nörnberg, G.R. Meinerz, T.J. Tonin, P. Bernhard, M.T. Frata // *Revista Brasileira de Zootecnia*. – 2017. – V. 46. <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-92902017000900003>.

507. *Steinbach, H.S.* Balance between mineralization and immobilization of nitrogen as affected by soil mineral nitrogen level / H.S. Steinbach, R. Alvarez, C.R. Valente // *Agrochimica*. – 2004. – V. 48. – № 5-6. – P. 204–212.

508. *Tamosiune, I.* Role of Endophytic Bacteria in Stress Tolerance of Agricultural Plants: Diversity of Microorganisms and Molecular Mechanisms / I. Tamosiune,

D. Baniulis, V. Stanys / In book Probiotics in Agroecosystem. – Springer, Singapore, 2017. – 537 p.

509. *Trehan, S.P.* Effects of an organic manure on the transformations of ammonium nitrogen in planted and unplanted soil / S.P. Trehan, A. Wild // *Plant and Soil.* – 1993. – V. 151. – № 2. – P. 287–294.

510. *Triplett, E.* Diazotrophic endophytes: prospects for nitrogen fixation in monocots / E. Triplett // *Plant and Soil.* – 1996. – V. 186. – P. 29–38.

511. *Van Veen, J.A.* Fate and activity of microorganisms introduced into soil / J.A. Van Veen, L.S. van Overbeek, J.D. van Elsas // *Microbiology and molecular biology rev.* – 1997. – V. 61. – № 2. – P. 121–135.

512. *Venkataraman, G.S.* Non-symbiotic nitrogen fixation / G.S. Venkataraman / *Rev. Soil Res. India, 12 Int. Congr. Soil Sci.* – New Dehly, 1982. – P. 205–235.

513. *Wagger, M.G.* Mineralization of Nitrogen from Nitrogen-15 Labeled Crop Residues Under Field Conditions / M.G. Wagger, D.E. Kissel, S.J. Smith // *Soil Science Society of America Journal.* – 1985. – V. 49. – № 5. – P. 1220–1226.

514. *Wani, S.P.* Inoculation with Associative Nitrogen-Fixing Bacteria: Role in Cereal Grain Production Improvement / S.P. Wani // *Indian Journal Microbiology.* – 1990. – V. 30. – № 4. – P. 363–393.

515. *Whisler, F.D.* Crop Simulation Models in Agronomic Systems / F. D. Whisler, D. N. Baker, B. Acock, V.R. Reddy // *Advances in Agronomy.* – 1986. – V. 40. – P. 141–208.

516. *Wolf, J.* Modeling long-term crop response to fertilizer and soil nitrogen I. Model description and application / J. Wolf, C.T. De Wit, H. Van Keulen // *Plant and Soil.* – 1989. – V. 120. – P. 11–22.

517. *Zhu, Y.* Evaluation of the plant-growth-promoting abilities of endophytic bacteria from the psammophyte *Ammodendron bifolium* / Y. Zhu, X. She // *Canadian Journal of Microbiology.* – 2018. – V.75. – №1. – P. 1–12.

А. А. Алферов

**АССОЦИАТИВНЫЙ АЗОТ,
УРОЖАЙ И УСТОЙЧИВОСТЬ
АГРОЭКОСИСТЕМЫ**

Подписано в печать 15.10.2020

Формат 70x100/16

Гарнитура Times

Усл.-п. л. 11,5. Уч.-изд. л. 12,3

Тираж 300 экз.

Издатель – Российская академия наук

Публикуется в авторской редакции

Корректурa и верстка – ООО "ВИН" / www.winfirm.ru

Отпечатано в экспериментальной цифровой типографии РАН

Издается по решению Научно-издательского совета

Российской академии наук (НИСО РАН)

и распространяется бесплатно

