

РАЗВИТИЕ АГРОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИЗОТОПОМ ^{15}N В РОССИИ

А.А. Завалин, ак. РАН, О.А. Соколов, д.б.н., Н.Я. Шмырева, к.б.н.,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова» (ФГБНУ «ВНИИ агрохимии»)
127550, Россия, г. Москва, ул. Прянишникова, 31а



Показано, что в агрохимических исследованиях в России метод изотопной индикации применяется 70 лет. Основным направлением явилось применение метода в изучении механизмов круговорота азота в системе почва-удобрение-растение-атмосфера. Поступающий ^{15}N сразу же вовлекается в почвенные структуры и вступает в процессы обмена с почвенным азотом. В процессе трансформации потери азота удобрения составляют 10-59% от применяемой дозы, тогда как потери азота почвы варьируют в пределах 30-200 кг N/га. Установлено, что сельскохозяйственные культуры используют 35-51% азота минеральных удобрений и 14-22% азота органических удобрений, газообразные потери азота составляют 22-33 и 17-32%, соответственно. В продукционном процессе злаковых культур принимает участие 20-30% азота удобрения и 70-80% азота почвы; у бобовых растений 10-15% азота удобрения, 20-30 азота почвы и 45-65% симбиотического азота соответственно. Выявлено, что технология локального способа применения удобрений повышает использование азота минеральных удобрений растениями в 1,5 раза, азота органических удобрений в 1,3 раза. Локализация азотных удобрений является альтернативой применению ингибиторов нитрофикации. Из пахотного слоя почвы растения используют 32-55% азота удобрения, тогда как из более глубоких слоев – в 1,5-3,7 раза меньше. Повышенные дозы азота минеральных удобрений усиливают мобилизацию почвенного азота, тогда как солома злаковых культур тормозит ее. Интенсивность поглощения и использование азота растениями генотипически детерминированы. При аммонийном питании синтез аминокислот в клетках корня начинается сразу же после контакта корней с почвенным раствором. Азот, поступивший в растение на ранних этапах развития пшеницы, в меньшей степени используется на синтез белков в зерне, чем поступивший на более поздних этапах. Установлено, что водная эрозия и подкисление почв повышают газообразные потери азота удобрения в 1,3-1,8 раза и в 1,4-1,5 раза почвенного азота. В исследованиях с ^{15}N определено, что 80 % азота нитратных фондов накапливается за счет почвенного азота.

Ключевые слова: агрохимические исследования, изотоп ^{15}N , трансформация, миграция, газообразные потери, удобрения, почвенный профиль, симбиотическая фиксация, ассимиляция, метаболизация, водная эрозия, подкисление почвы, загрязнение.

Для цитирования: Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Развитие агрохимических исследований с изотопом ^{15}N в России // Плодородие. – 2021. – №3. – С. 56-62. DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.10.

Изотопная индикация ^{15}N является объективным и наиболее точным методом агрохимических исследований круговорота азота в системе почва-удобрение-растение-атмосфера. В начале 60-х годов прошлого века исследования с применением изотопа азота начали развиваться во Всесоюзном научно-исследовательском институте удобрений и агропочвоведения имени Д.Н. Прянишникова и других научных и учебных заведениях страны.

Цель нашей работы – обобщить экспериментальный материал применения метода изотопной индикации ^{15}N в агрохимических исследованиях и определить направления будущих исследований.

Стратегия использования метода изотопной индикации ^{15}N направлена на решение задач:

- познание механизмов трансформации азота в почве, управление процессами азотного питания растений;
- разработка природоподобных экологически безопасных и эффективных технологий применения азотных удобрений;
- обеспечение продовольственной, экологической безопасности и устойчивого развития страны.

В зависимости от поставленных задач метод изотопной индикации ^{15}N используют при проведении исследований в условиях вегетационного, микрополевого, лизиметрического и полевого опытов, гидропоники и аэропоники, климатических камер.

В агрохимических исследованиях метод изотопной индикации сочетается с рядом других методов: хроматографии, гель-фильтрации, электроультрафильтрации (ЭУФ). В агрохимических исследованиях используют как обогащенные, так и обедненные ^{15}N соединения. Точность опыта 0,2% [23, 41, 52].

Сложность управления азотными циклами состоит в том, что азот в почве находится одновременно в трех средах: твердой, жидкой и газообразной. Поступающий азот сразу вовлекается во внутрипочвенные процессы его трансформации [29, 33, 49, 50]. В почве постоянно происходит обмен ^{15}N удобрения и органического азота почвы. При этом наблюдаются снижение ^{15}N в минеральном азоте и увеличение его содержания во фракции органического азота. В то же время в солевой вытяжке отмечено одновременное увеличение ^{14}N и ^{15}N вследствие нитрификации первоначально фиксируемого почвой меченого ^{15}N сульфата аммония, хотя возможна реминерализация ранее поглощенного микроорганизмами азота удобрения [51]. Однако нельзя сводить явление «экстра» азота только за счет инверсии ^{14}N и ^{15}N , поскольку процессы иммобилизации и минерализации связаны между собой, они в достаточной степени автономны.

Фиксация $^{15}\text{N-NH}_4^+$ в дерново-подзолистой почве проходит на двучленных отложениях [23]. В первой зоне фиксация $^{15}\text{N-NH}_4^+$ связана с органическим веществом, слюдо-вермикулитовыми и слюдо-сметитовыми образованиями. Во второй зоне фиксация обусловлена смешанослойными образованиями в иллювиальной части профиля. Поглощение $^{15}\text{N-NH}_4^+$ связано с распределением 1,2 нм компонентов илестой фракции.

Применение удобрений повышает миграцию азота из-за усиления подвижности природных соединений почвенного азота (94-96% от общих потерь) [7, 60]. Потери в результате вымывания из супесчаной дерново-подзолистой почвы составили 31 кг $^{15}\text{N}/\text{га}$, из тяжело-суглинистой – 6,6 кг $^{15}\text{N}/\text{га}$, однако на долю азота удобрения приходилось 4,5 и 1 кг $^{15}\text{N}/\text{га}$ соответственно [6]. При выращивании яровых зерновых культур на дерново-подзолистой суглинистой почве потери азота удобрения за счет вымывания не превышали 3,7% от применяемой дозы, при выращивании их на супесчаной почве потери ^{15}N не превышали 5% [7, 26].

По данным исследований с ^{15}N , газообразные потери азота почвы варьируют от 60 до 200 кг $\text{N}/\text{га}$ на черноземах и 30-45 кг $\text{N}/\text{га}$ на дерново-подзолистых почвах [3, 5, 53]. Газообразные потери азота удобрения при выращивании сельскохозяйственных культур могут достигать 59% от применяемой дозы. Экологическое значение гетеротрофной нитрификации (в отличие от автотрофной) состоит в том, что газообразные соединения в форме закиси азота образуются в условиях кислой среды.

Иммобилизацию и мобилизацию азота обеспечивают почвенные микроорганизмы, которые осуществляют ряд процессов: аммонификацию, нитрификацию, денитрификацию и азотфиксацию. В результате через микробные клетки проходит поток азота, превышающий в 2-3 раза ежегодное потребление его сельскохозяйственными культурами. Если в органическом веществе соотношение $\text{C}:\text{N}$ ниже, чем у микроорганизмов, то в почве происходит минерализация азота, при

более широком соотношении $\text{C}:\text{N}$ имеет место нетто-минерализация [32, 49]. Размеры ассимиляции азота органического вещества зависят от многих факторов и составляют 12-80% от внесенного количества. Скорость иммобилизации ^{15}N удобрения микроорганизмами в серой лесной почве составляет 60 мг/кг азота в сутки.

Чем лучше растения используют и усваивают азот удобрения и почвенный азот, тем выше агрохимическая эффективность применения удобрений и ниже экологическая напряженность в агроландшафте. Оптимизация азотного питания растений тесно связана с решением эколого-агрохимических задач: повышение коэффициента использования азота удобрений, сокращение газообразных потерь азота, снижение аккумуляции нитратов (нитрозоаминов) в продукции и природных водах.

Направленность потоков азота в агроэкосистеме зависит от вида применяемых удобрений (табл. 1). Сельскохозяйственные культуры лучше используют азот минеральных удобрений и более чем в 2 раза меньше азот органических удобрений [7, 53]. При этом при внесении органических удобрений в почве иммобилизуется и теряется примерно одинаковое количество азота по сравнению с азотными минеральными удобрениями.

1. Баланс азота минеральных и органических удобрений (меченых ^{15}N) при выращивании сельскохозяйственных культур, % от внесенного

Удобрения	Использование растениями	Иммобилизация в почве	Газообразные потери
Минеральные азотные	35-51	14-46	22-33
Органические:			
навоз бесподстильный	19-22	52-58	23-32
зеленые удобрения	14-20	32-74	17-35

В продукционном процессе возделываемых культур непосредственное участие принимают азот удобрений и почвенный азот (20-30% азот удобрения и 70-80 азот почвы от общего выноса азота у небобовых растений и 10-15% азот удобрения, 20-30 азот почвы и 45-65% симбиотический азот у бобовых культур).

В силу своих биологических особенностей возделываемые культуры используют и потребляют неодинаковое количество азота удобрения [3, 15, 22, 23, 48, 55]. Бобовые растения характеризуются наибольшим использованием азота удобрения в относительных цифрах, тогда как в абсолютных цифрах – наименьшей величиной (табл. 2). В абсолютном выражении наибольшее количество азота потребляют растения, больше азота иммобилизуется и теряется при выращивании овощных культур.

2. Баланс азота минеральных удобрений (меченых ^{15}N) при выращивании различных групп сельскохозяйственных культур*

Культуры	Использовано растениями	Иммобилизация	Газообразные потери
Злаковые	33-48 30-45	11-59 10-53	23-39 21-47
Бобовые	36-48 22-29	23-34 10-53	23-28 21-47
Овощные	18-47 22-56	12-52 14-62	28-62 34-74

*Числитель – использование азота, % от применяемой дозы; знаменатель – потребление азота, кг/га.

К экологически безопасным технологиям применения удобрений, обеспечивающим синхронизацию образования подвижных форм азота в почве к онтогенетическим этапам поглощения, использования и потребления его растениями относится локальный способ внесения органических и минеральных азотных удобрений [34, 37, 38, 54, 59]. В исследованиях с мечеными ^{15}N азотными удобрениями при локальном способе их внесения (лента, экран) в почве создается очаг повышенной концентрации минерального азота, тормозящий на 5-6 недель нитрификацию, денитрификацию и ферментативную активность, усиливающий мобилизацию почвенного азота. При этом в растениях усиливается поглощательная и синтетическая функция корней, повышается транспорт аммонийной формы азота в надземные органы растений, активизируется активность метаболических процессов, растет фотосинтетический потенциал. В результате использование азота минеральных удобрений растениями и симбиотического азота (у бобовых культур) повышается в 1,5 раза, а азота навоза – в 1,3 раза по сравнению с разбросным способом. При этом газообразные потери азота минеральных удобрений сокращаются в 1,8 раза, поэтому локализация азотных удобрений является альтернативой применению ингибиторов нитрификации.

Ингибиторы нитрификации подавляют процессы нитрификации-денитрификации [40, 53, 59]. При внесении цианогуанидина (ц.г.) и 2,4-бромацетанилида (б.а.) в дозе 0,2-0,5% от дозы удобрения потери азота удобрения снижались в 1,5-2 раза, одновременно возрастала его иммобилизация в почве и снижалась миграция нитратов вниз по профилю.

При внесении ингибитора нитрификации N-serve урожай риса в условиях орошения повышался на 6-11 ц/га, тогда как при локальном внесении мочевины (доза 180 кг N/га в один рядок с семенами) рис формировал урожай зерна на 7-12 ц/га выше [4, 52].

С помощью меченых ^{15}N азотных удобрений изучены доступность и эффективность потребления и использования азота удобрения и азота почвы растениями в зависимости от свойств различных слоев почвенного профиля (водный и воздушный режимы, гранулометрический состав, состав и разнообразие микробоценоза, морфологические и функциональные особенности корневой системы возделываемых культур) [1, 28, 31, 34, 37, 39]. При внесении удобрений в пахотный слой различные культуры (яровая пшеница, ячмень, сахарная и кормовая свекла) использовали 32-55% азота удобрения. При внесении удобрений в глубокие слои почвы (до 1 м) использование азота растениями снижалось в 1,5-3,7 раза. Наибольшее количество азота удобрения гречиха использовала с глубины 60-70 см. Газообразные потери азота аммонийной формы удобрения ($^{15}\text{N-NH}_4^+$) в различных слоях достигали 9-38%; при внесении нитратной формы удобрения ($^{15}\text{N-NO}_3^-$) газообразные потери возрастали в 2,2 раза [20].

Основное количество (66%) азотного пула бобовых культур формируется за счет фиксации $^{15}\text{N}_2$ атмосферного азота. В свою очередь, злаковые культуры формируют урожай на 13-21% за счет биологического азота [16, 35]. Внесение соломы злаковых культур снижает потери ^{15}N азотных удобрений, повышает иммобилизацию азота и симбиотическую азотфиксацию люпина [9]. Азот в минеральных удобрениях в повышенных

дозах усиливает мобилизацию почвенного азота и подавляет симбиотическую азотфиксацию бобовых растений [55]. При использовании ассоциативных diaзотрофов в агрофитоценоз поступает 30-60 кг/га атмосферного азота. Применение биопрепаратов на основе ассоциативных diaзотрофов эквивалентно дозе 30-55 кг N/га. В исследованиях с ^{15}N установлено, что доля биологического азота в выносе с урожаем растений, фиксированного ассоциативными микроорганизмами, составляет 10-15% [2, 16].

Интенсивность поглощения и использования азота удобрения растениями генетически детерминирована и связана с функциональной активностью корневой системы (наличие каналов и переносчиков $^{15}\text{NH}_4^+$ и $^{15}\text{NO}_3^-$) [13, 14, 18]. По-видимому, на единицу площади корня у диплоидов синтезируется больше NRT-1 генов с низким сродством к NO_3^- , чем у полиплоидных форм пшеницы.

Поступающий ^{15}N удобрений активно участвует в ассимиляции, метаболизме азотистых соединений растений, в формировании экологически безопасной продукции. Уже через 15 мин азот удобрения включается в синтез аминокислот клеток корня, при этом включение ^{15}N в амидные группы идет в 2-3 раза интенсивнее, чем в аминные группы [56-58]. Синтез аминокислот в клетках корня начинается сразу после его контакта с аммонийным азотом и лишь на следующие сутки, если источником азота служит нитратный азот [8, 30]. При аммонийном источнике питания ускоряется транспорт аминокислот в надземные органы растений (по сравнению с нитратной формой азота) пшеницы, кроме того идет дополнительное поступление ^{15}N -глутаминовой кислоты в цветковые чешуи [42, 43]. Включение ^{15}N -глутаминовой кислоты в оболочки семени в 1,5 раза меньше, чем в зародыше, а основное количество азота накапливается в алейроновом слое.

С применением стабильного изотопа ^{15}N показано, что использование азота вегетативных органов на синтез белков в зерне пшеницы зависит от времени поступления его в растения [10]. Азот, поступивший в растения на ранних этапах развития пшеницы (до трубкования), в меньшей степени используется на синтез белков в зерне, чем поступивший на более поздних этапах. Снижение содержания азота в вегетативных органах вызвано его оттоком в зерно и корни.

Эффективность ассимиляции и накопления азота растениями тесно связана с функционированием метаболического (активного) и вакуолярного (запасного) пулов нитратов [54]. В исследованиях с ^{15}N установлено, что 80% азота нитратных фондов накапливается за счет почвенного азота. При локализации азотных удобрений активизируется метаболический пул и количество $^{15}\text{NO}_3^-$, а количество почвенного NO_3^- в растениях снижается.

Только в длительных исследованиях с использованием метода изотопной индикации ^{15}N возможно получить объективную и полную информацию о влиянии систематического применения азотных удобрений на круговорот и баланс азота, изменение плодородия почвы, продуктивность и качество урожая сельскохозяйственных культур и состояние окружающей среды. В длительных исследованиях при систематическом применении меченого ^{15}N азотных удобрений установлены направленность и интенсивность потоков азота удобре-

ния, почвенного и симбиотического азота в системе почва-растение-атмосфера, определяющие устойчивое развитие агроэкосистем [11, 12, 17, 24].

Водная эрозия затрагивает глубинные процессы внутрипочвенного цикла азота. При внесении сульфата аммония (меченого ^{15}N) возделываемые культуры (озимая рожь, овес, ячмень, многолетние бобово-злаковые травы 1-го и 2-го годов жизни) в 1,3-1,5 раза больше потребляли азот удобрения, почвенный и симбиотический азот на приводораздельной части склона по сравнению с нижней смытой его частью [16, 62]. Газообразные потери азота удобрения при выращивании зерновых культур на приводораздельной части склона снижались в 1,3-1,8 раза, азота почвы – в 1,4-1,5 раза, а при выращивании трав – в 1,3-3,0 и 1,2 раза соответственно по сравнению с нижней частью склона. При выращивании многолетних бобово-злаковых трав на верхней приводораздельной части склона газообразные потери симбиотического азота сокращались в 1,4-3,5 раза по сравнению с нижней частью склона.

В условиях склонового рельефа ^{15}N мигрирует вниз по склону от места его внесения на расстояние 5 м в 1-й год применения азотных удобрений, 9 м – на 3-й год и 55 м – через 15 лет на приводораздельной части и на 8, 13, 72 м соответственно в нижней его части [17, 19, 52, 63].

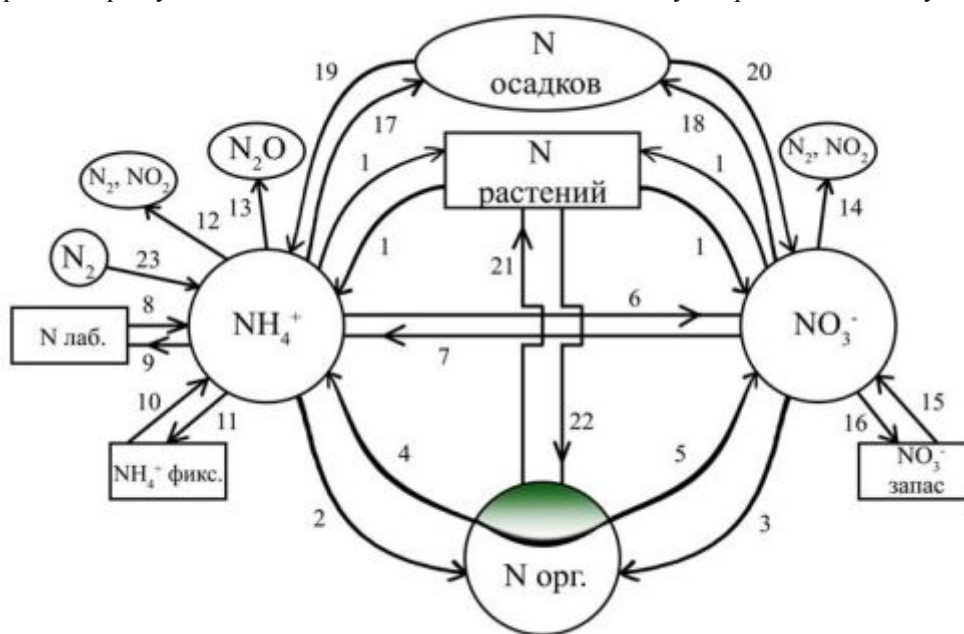
Для современных черноземных почв характерно проявление ряда негативных процессов: водная эрозия и подкисление [36]. Вследствие ухудшения азотного режима почв усиливаются процессы мобилизации почвенного азота и его газообразные потери вплоть до $^{15}\text{N}_2\text{O}$ [21, 25, 27]. При подкислении черноземов озимая пшеница использовала в 1,2 раза меньше азота удобрения.

При известковании дерново-подзолистых почв газообразные потери азота растут вследствие создания бла-

гоприятных условий для развития нитрифицирующих и денитрифицирующих микроорганизмов [47]. При известковании потери азота возрастают в 1,5-2 раза, тогда как иммобилизация ^{15}N аммиачной селитры снижалась в 1,2-1,3 раза [23]. Эффективность известкования, как приема снижения потерь азота удобрения, на супесчаной почве достигала 43%, на тяжелосуглинистой – 25% [61].

Одним из негативных факторов, существенно влияющих на внутрипочвенные циклы азота, является загрязнение почв поллютантами (тяжелые металлы, фториды, пестициды). При загрязнении почвы тяжелыми металлами газообразные потери ^{15}N удобрениями возрастают в 3,6 раза, а при загрязнении почвы фторидами – в 1,4 раза [44, 46]. При этом снижаются иммобилизация и использование азота удобрения растениями. При загрязнении почв тяжелыми металлами и фторидами происходит перестройка гумусового комплекса: доля фракций ГК-2 и ФК-1 повышается, а фракций ГК-1 и ФК-2 снижается почти в 2 раза [45].

Поскольку в экосистеме азот находится в различных формах: твердой, жидкой и газообразной, в почве и растениях – в органической, молекулярной и ионной (окисленной, восстановленной) (рис.), в основе круговорота азота лежат иммобилизационно-минерализационные процессы, процессы гетеротрофного и автотрофного циклов. Азот участвует в процессах поглощения и выделения, транспорта в растениях (трансмембранный, ближний, дальний, радикальный) и в почве (с поверхностным стоком, миграцией по профилю). Он активно участвует в синтезе белков растений и микроорганизмов и гумуса в почве, входит в состав веществ, загрязняющих окружающую среду, животноводческую и растениеводческую продукцию.



1-23 – процессы круговорота ^{15}N
Рис. Концептуальная схема модели круговорота азота в системе почва-растение-атмосфера

Учитывая значимость и точность метода изотопной индикации и используя системный подход и комплекс методов управления потоками азота, в ближайшее время перспективными будут исследования с использованием ^{15}N по изучению:

- участия азота органических, минеральных удобрений и почвенного азота (меченых ^{15}N) в

формировании гумусового вещества почв разной удобрённости;

- механизмов участия азота микробной биомассы в минерализационно-иммобилизационных циклах азота в почве и формировании активного органического вещества;

• роли азота органических, минеральных удобрений и почвенного азота в образовании и выделении $^{15}\text{N}_2\text{O}$ разных типов почв в зависимости от сопряженности процессов иммобилизации и мобилизации азота;

• разработок по созданию новых форм синхронных азотных удобрений и новых технологий их применения, максимально адаптированных к потреблению растениями в процессе роста и развития;

• новой технологии получения органических удобрений путем компостирования биомассы, меченой ^{15}N сидератами с жидкими органическими удобрениями (бесподстилочный навоз, животноводческие стоки);

• поиска природных источников углерода, обеспечивающих минерализационно-иммобилизационные процессы трансформации органических удобрений в почве и оптимизацию круговорота азота в агроэкосистеме;

• роли транспортных белков в транспорте $^{15}\text{N-NO}_3^-$ и $^{15}\text{N-NH}_4^+$ через клеточные мембраны цитоплазмы и тонопласта, обеспечивающие эффективность ассимиляции азота;

• поиска природных источников углерода (с широким соотношением C:N), регулирующих (оптимизирующих) иммобилизационно-минерализационные процессы и доступность азота возделываемым культурам;

• генетики микробных и растительных компонентов, приемы генной, хромосомной, клеточной и тканевой инженерии и особенности трансформации биологического азота в почве;

• разработки методологии проведения исследований в системе Географической сети опытов с азотными удобрениями, мечеными ^{15}N , с целью управления потоками азота в агроэкосистеме и создания бездефицитного его баланса;

• системы применения азотных органических и минеральных удобрений для оптимизации продукционного процесса сортов нового поколения возделываемых культур;

• количественной оценки изменений в циклах азота (соотношение гетеротрофного и автотрофного циклов), обеспечивающих повышение плодородия почвы, устойчивое развитие, оптимизацию продукционного процесса и получение экологически безопасной продукции.

Следовательно, исследования с использованием метода изотопной индикации ^{15}N способствовали развитию работ Д.Н. Прянишникова и Д.А. Сабина в области азотного питания растений и круговорота азота в агроэкосистеме. В свою очередь регуляция и управление потоками азота в агроэкосистеме направлены: на сохранение и повышение плодородия почвы, оптимизацию азотного питания растений в онтогенезе, обеспечение рационального применения азотных удобрений без негативного воздействия на окружающую среду, продовольственную безопасность и устойчивое развитие. Использование метода изотопной индикации ^{15}N для разработки технологии управления круговоротом азота в биосфере обеспечивает формирование экологически безопасных потоков азота в экосистеме, создание экологически безопасной среды обитания человека.

Литература

1. Акулов П.Г., Лукин С.В. Потребление сахарной свеклой нитратного азота, мигрировавшего профиля// Почвоведение. – 1996. – №11. – С. 1385-1388.

2. Алферов А.А. Влияние сидерата и Ризоагрина на продуктивность яровой пшеницы и трансформацию азота удобрения// Кормпроизводство. – 2017. – №12. – С. 8-11.

3. Андреева Е.А., Щеглова Г.М., Середкина Н.Н. Результаты полевых исследований применения сернокислого аммония, меченого ^{15}N // Агрохимия. – 1981. – №5. – С. 3-14.

4. Бочкарев А.Н. Потери азота с водой при выращивании риса и пути их снижения// Агрохимия. – 1980. – №10. – С. 3-11.

5. Будажапов Л.В., Лаврова И.А. Влияние систематического применения азотных удобрений на изменение азотного фонда дерново-подзолистой почвы и урожай зерновых культур// Агрохимия. – 1998. – № 3. – С. 5-9.

6. Варюшкина Н.М., Карпанева А.И. Трансформация азота удобрений при ежегодном их внесении в дерново-подзолистые почвы// Почвоведение. – 1984. – №10. – С. 116-120.

7. Варюшкина Н.М., Карпанева Л.И., Никифорова М.В., Семенов Ю.И. Превращение азота минеральных и органических удобрений в дерново-подзолистой почве опыта с озимой пшеницей (по данным с ^{15}N). В кн. Круговорот и баланс азота в системе почва-удобрение-растение-вода. – М.: Наука, 1979. – С. 191-196.

8. Верниченко И.В. Ассимиляция аммонийного и нитратного азота и эндогенное образование нитратов (исследования с ^{15}N). – М.: РГАУ-МСХА, 2017. – 248 с.

9. Верниченко Л.Ю., Миллер Ю.М. Влияние аммония и нитрата на усвоение молекулярного и связанного азота бобово-ризобинальным симбиозом. Кн.: Привлечение ^{15}N в агрохимических исследованиях. – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 119-125.

10. Воллейт Л.П., Кузнецова С.С. Поступление и использование азота удобрений на синтез белков в зерне озимой пшеницы. В Кн. Плодородие почв Нечерноземной полосы и приемы его регулирования. – Пушкино: ОНТИ, 1975. – С. 48-63.

11. Гамзиков Г.П. Состояние и перспективы исследований в длительных стационарных опытах с удобрениями в Сибири// Плодородие. – 2016. – №5. – С. 6-9.

12. Гамзиков Г.П., Барсуков П.А. Баланс азота при длительном применении удобрений в агроценозах на дерново-подзолистой почве// Агрохимия. – 1997. – №9. – С. 5-10.

13. Гамзикова О.И. Этюды по физиологии, агрохимии и генетике минерального питания растений. – Новосибирск: Агрос, 2008. – 372 с.

14. Гамзикова О.И., Коваль С.Ф., Барсукова С.Ф. Влияние генов короткостебельности на использование азота пшеницей// Агрохимия. – 1991. – №1. – С. 12-17.

15. Ефимов В.Н., Царенко В.П. Удобрение сельскохозяйственных культур на мелиорированных торфяных почвах. – М.: Росагропромиздат, 1988. – 121 с.

16. Завалин А.А. Биопрепараты, удобрения и урожай. – М.: ВНИИ-А, 2005. – 302 с.

17. Завалин А.А., Шмырева Н.Я., Соколов О.А. Потоки ^{15}N , почвенного и симбиотического азота в дерново-подзолистой эродированной почве// Агрохимия. – 2020. – №6. – С. 22-31.

18. Иващенко Н.В., Стармер И.Ф. Моделирование поглощения нитрата проростками кукурузы: отклонение от модели Михаэлиса-Ментен// Агрохимия. – 2000. – №7. – С. 10-17.

19. Каишанов А.Н., Явтушенко В.Е. Агроэкология почв склонов. – М.: Колос, 1997. – 240 с.

20. Кидин В.В., Гуцина Е.О., Зенкина В.В. Особенности трансформации аммонийного и нитратного азота в профиле дерново-подзолистой почвы и их потребление кормовой свеклой// Агрохимия. – 2009. – №10. – С. 17-23.

21. Козловский Е.В., Небольсин А.Н., Алексеев Ю.В., Чуриков А.П. Известкование почв. – Л.: Колос, 1983. – 282 с.

22. Кораблева Л.И., Авдеева Т.Н. Современные проблемы применения азотных удобрений в овощеводстве на аллювиальных почвах Московской области. В кн. Современное развитие научных идей Д.Н. Прянишникова. – М.: Наука, 1991. – С. 142-155.

23. Кореньков Д.А. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений. – М.: Агроконсалт, 1999. – 296 с.

24. Кореньков Д.А., Борисова Н.И., Васенева Л.В., Семенов Ю.И. Превращение изотопно-меченого иммобилизованного азота удобрений в системе почва-растение в полевых условиях за 14 лет. В кн. Применение ^{15}N в агрохимических исследованиях. – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 32-34.

25. Кореньков Д.А., Борисова Н.И. Успехи и перспективы использования стабильных изотопов в агрохимии// Вестник с.-х. науки. – 1980. – №9. – С. 22-27.

26. Кореньков Д.А., Романюк Л.А., Варюшкина Н.М., Кирпанева Л.И. Применение стабильного изотопа ^{15}N при изучении баланса азота удобрений в полевых лизиметрах на дерново-подзолистой супесчаной почве // *Агрохимия*. – 1975. – №4. – С. 3-8.
27. Кореньков Д.А., Руделев Е.В. Трансформация и использование азота ^{15}N озимой пшеницей в зависимости от сроков его внесения // *Агрохимия*. – 1985. – №10. – С. 3-10.
28. Кореньков Д.А., Руделев Е.В., Кузнецов А.В. Использование растениями минерального азота с различных глубин почвенного профиля // *Почвоведение*. – 1987. – №5. – С. 48-52.
29. Королева И.Е. Трансформация остаточного азота удобрений в зависимости от минералогического состава тонкодисперсной фракции почвы. В кн. *Почвенно-агрохимические и экологические проблемы формирования высокопродуктивных агроценозов*. – Пушкино: ОНТИ, 1988. – С. 95-99.
30. Кретович В.Л. Обмен азота в растениях. – М.: Наука, 1972. – 527 с.
31. Кудеяров В.Н., Соколов О.А., Бочкарев А.Н. Доступность растениям нитратного азота из различных горизонтов серой лесной почвы. Тр. X Междунар. конгр. Почвоведов. – М., 1974. Т. 9. – С. 117-123.
32. Кузнецова Т.В., Семенов А.В., Ходжаева А.К. Накопление азота в микробной биомассе серой лесной почвы при разложении растительных остатков // *Агрохимия*. – 2003. – №10. – С. 3-12.
33. Кузнецова Т.В., Тулина А.С., Розанова Л.Н., Семенов В.М., Кудеяров В.Н. О сопряженности процессов метаболизма углерода и азота в почве // *Почвоведение*. – 1998. – №7. – С. 832-839.
34. Лаврова И.А., Овсянников А.В. Эффективность азотных удобрений в зависимости от глубины внесения в опытах с яровой пшеницей на лугово-черноземных почвах // *Агрохимия*. – 1995. – №12. – С. 57-62.
35. Логинов Ю.М. Исследование фиксации азота люпином из воздуха с использованием молекулярного азота, меченого ^{15}N // *Агрохимия*. – 1966. – №11. – С. 21-28.
36. Лукин С.В. Агроэкологическое состояние и продуктивность почв Белгородской области. – Белгород: Константа, 2011. – 302 с.
37. Лукин С.В., Кирикой Я.Т., Карцев Ю.Г. Потребление свеклой азота натриевой селитры // *Сахарная свекла*. – 1992. – №1. – С. 33-35.
38. Мальцев В.Т. Использование меченого азота пшеницей из различных форм удобрений при поверхностном и локальном способах их внесения // *Агрохимия*. – 1985. – №6. – С. 3-11.
39. Мальцев В.Т. Формирование урожая яровой пшеницы и использование азота удобрений (^{15}N) в зависимости от глубины их размещения // *Агрохимия*. – 1988. – №8. – С. 3-7.
40. Муравин Э.А., Смирнов П.М., Татьянач Н.К., Шуин К.А. Использование растениями азота почвы и удобрения, баланс меченого ^{15}N азота удобрения в опытах с овощными культурами в полевых условиях // *Агрохимия*. – 1979. – №4. – С. 3-13.
41. Назарюк В.М. Баланс и трансформация азота в агроэкосистемах. – Новосибирск: СО РАН, 2001. – 257 с.
42. Павлов А.Н. Накопление белка в зерне пшеницы и кукурузы. – М.: Наука, 1967. – 339 с.
43. Павлов А.Н., Буракаева Б.Х., Колесник Т.И. О поступлении ^{15}N в цветковые чешуи и отдельные части зерновки пшеницы // *Докл. АН СССР*. – 1975. Т. 221. – №4. – С. 341-344.
44. Помазкина Л.В. Агрохимия азота в таежной зоне Прибайкалья. – Новосибирск: Наука, 1985. – 176 с.
45. Помазкина Л.В., Котова Л.Г., Лубнина Е.В. Устойчивость агроэкосистем к загрязнению фторидными. – Иркутск: ЦГСО РАН, 2004. – 225 с.
46. Помазкина Л.В., Котова Л.Г., Раднаев А.Б. Биогеохимические циклы азота в агроэкосистемах на техногенно-загрязненных почвах лесостепи Прибайкалья // *Почвоведение*. – 1999. – №6. – С. 779-784.
47. Ремпе Е.Х., Филимонов Д.А., Стрельникова Р.А. Влияние температуры, размеры газообразных потерь азота удобрений и микробиологические процессы в почве // *Агрохимия*. – 1980. – №11. – С. 77-86.
48. Сапожников Н.А. Баланс азота в земледелии Нечерноземной полосы и основные пути улучшения азотного питания культурных растений. В кн. *Азот в земледелии Нечерноземной полосы*. – Л.: Колос, 1973. – С. 5-33.
49. Семенов В.М. Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве // *Агрохимия*. – 2020. – №6. – С. 78-96. doi: 10.31857
50. Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Кудеяров В.Н. Иммобилизационно-мобилизационные превращения азота в серой лесной почве // *Почвоведение*. – 1995. – №4. – С. 472-479.
51. Сирота Л.Б. Факторы, определяющие поступление почвенного азота в растения при внесении азотных удобрений. В кн. *Применение стабильного изотопа ^{15}N в исследованиях по земледелию*. – М.: Колос, 1973. – С. 166-177.
52. Смирнов П.М. Вопросы агрохимии азота (в исследованиях с ^{15}N). – М.: ТСХА, 1982. – 74 с.
53. Смирнов П.М., Кидин В.В., Якимов И.К. Превращение меченого ^{15}N азота бесподстилочного навоза и сульфата аммония в почве при внесении ингибитора нитрификации // *Агрохимия*. – 1982. – №9. – С. 3-18.
54. Соколов О.А., Семенов В.М. Теория и практика рационального применения азотных удобрений. – М.: Наука, 1992. – 207 с.
55. Трепачев Е.П. Агрохимические аспекты биологического азота в современном земледелии. – М.: Агроконсалт, 1999. – 532 с.
56. Турчин Ф.В. Азотное питание растений и применение азотных удобрений. – М.: Колос, 1972. – 336 с.
57. Турчин Ф.В., Гуминская М.А., Плышевская Е.Г. Исследование азотного обмена с применением изотопа ^{15}N // *Физиология растений*. – 1955. – Т. 2. – №1. – С. 70-79.
58. Турчин Ф.В., Гуминская М.А., Плышевская Е.Г. О скорости обновления белка и хлорофилла в высших растениях // *Известия АН СССР. Сер. биол.*, 1953. – №6. – С. 102-117.
59. Филимонов Д.А., Вьюкова О.Б. Трансформация в почве, баланс и эффективность меченого ^{15}N сульфата аммония при локальном внесении ингибитора нитрификации // *Агрохимия*. – 1985. – №7. – С. 8-15.
60. Филимонов Д.А., Руделев Е.В. Потери азота удобрений и почвы при вымывании на основных почвенных разностях Нечерноземной зоны. Кн.: *Круговорот и баланс азота в системе почва-удобрение-растение-вода*. – М.: Наука, 1979. – С. 113-127.
61. Филимонов Д.А., Стрельникова Р.А. Баланс азота удобрения на кислых и известкованных дерново-подзолистых почвах при чередовании культур // *Агрохимия*. – 1986. – №8. – С. 3-7.
62. Шмырева Н.Я. Использование азота удобрений озимой рожью при различных способах внесения азотных удобрений в условиях эрозионного ландшафта // *Агрохимия*. – 2007. – №10. – С. 44-49.
63. Явтушенко В.Е., Рындич Л.П. Миграция азота в смывом выщелоченном черноземе // *Химизация с.-х.* – 1989. – №9. – С. 27-28.

DEVELOPMENT OF AGROCHEMICAL RESEARCHES WITH THE ^{15}N ISOTOPE IN RUSSIA

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

Pryanishnikov Institute of Agrochemistry, Pryanishnikova ul. 31A, 127434 Moscow, Russia

In agrochemical research in Russia, the isotope indication method has been used for 70 years. The main direction was the application of the method in the study of the mechanisms of the nitrogen cycle in the soil-fertilizer-plant-atmosphere system. The incoming ^{15}N is immediately involved in soil structures and enters into exchange processes with soil nitrogen. During the transformation process, the nitrogen loss of the fertilizer is 10-59% over the applied dose, while the nitrogen loss of the soil varies in the diapason 30-200 kg N/ha. Agricultural crops use 35-51% nitrogen of mineral fertilizers and 14-22% nitrogen of organic fertilizers, the gaseous nitrogen losses are 22-33% and 17-32%, respectively. In the production process of cereals, 20-30% of fertilizer nitrogen and 70-80% of soil nitrogen take part; in legumes, 10-15% of fertilizer nitrogen, 20-30% of soil nitrogen and 45-65% of symbiotic nitrogen, respectively. The technology of the local of application of fertilizers increases the use of nitrogen of mineral fertilizers by plants by 1.5 times, nitrogen of organic fertilizers by 1.3 times. The localization of nitrogen fertilizers is an alternative to the use of nitrification inhibitors. From the arable layer of soil, plants use 32-55% of the fertilizer nitrogen, while from deeper layers, its use is reduced by 1.5-3.7 times. Nitrogen of increased doses of

mineral fertilizers increases the mobilization of soil nitrogen, while the straw of cereals slows it down. The intensity of nitrogen uptake and use by plants is genotypically determined. With an ammonium diet, the synthesis of amino acids in the root cells begins immediately after the contact of the roots with the soil solution. The nitrogen that entered the plant in the early stages of wheat development is less used for the synthesis of proteins in the grain than the nitrogen that entered in the later stages. Water erosion and acidification of soils increases the gaseous losses of nitrogen from fertilizers by 1.3-1.8 times and nitrogen from soil by 1.4-1.5 times.

In the studies with ^{15}N discovered that the main amount of nitrates in the crop is accumulated due to soil nitrogen (70-80% of the total amount).

Key words: heavy nitrogen isotope ^{15}N , ^{15}N transformation in soil, ^{15}N migration, ^{15}N gaseous losses, nitrogen immobilization, nitrogen mineralization, consumption and use of fertilizer nitrogen and soil nitrogen by plants, fertilizer nitrogen balance, nitrogen fertilizer application technology, use of ^{15}N deep layers of the soil profile, genotypic signs of ^{15}N assimilation by plants, symbiotic and associative ^{15}N fixation, assimilation and metabolism, cell pools of ^{15}N compounds, transport of ^{15}N in plants, long-term studies with ^{15}N , ^{15}N and water erosion, ^{15}N and acidification of chernozem, contamination of components (including products) with nitrogenous compounds.

УДК 633.18: 631.81.095.337

DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.11

МЕДНЫЕ УДОБРЕНИЯ В РИСОВОМ АГРОЦЕНОЗЕ

А.Х. Шеуджен^{1,2}, ак. РАН, Т.Н. Бондарева^{1,2}, к.с.-х.н., О.А. Гуторова¹, д.с.-х.н., Я.Б. Петрик¹

¹Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина

350044, Россия, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, e-mail: ashad.sheudzhen@mail.ru

²Федеральный научный центр риса, 350921, Россия, г. Краснодар, п. Белозерный, 3



Рассмотрена эффективность применения медных удобрений на посевах риса. Предпосевное обогащение семян медью способствует повышению их урожайности на 2,5-6,2 ц/га, выхода семян – на 1,3-2,1 %, коэффициента размножения семян – на 1,1-2,7 ед.; доли крупной и средней фракций в семенной массе, соответственно, на 3-7 и 11-13 %. Наилучший эффект достигается при обработке посевного материала 0,5%-ным водным раствором меди. Этот агроприем позволяет увеличить урожайность зерна и семян риса на 6,2 ц/га.

Ключевые слова: рис, медь, обработка семян, урожайность, фракционный состав семян, посевные качества семян.

Для публикации: Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н., Гуторова О.А., Петрик Я.Б. Медные удобрения в рисовом агроценозе // Плодородие. – 2021. – №3. – С. 62-65. DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.11.

Технология возделывания риса на Кубани предусматривает прорастание семян в условиях затопления при незначительном их обеспечении кислородом. Хотя рис и приспособлен к прорастанию в таких условиях, однако длительное нахождение проростков под слоем воды вызывает их гибель. Скорость прорастания семян находится в тесной зависимости от температуры окружающей среды, поэтому очень часто низкие температуры весной замедляют темпы роста проростков, что ведет к массовой их гибели. Полевая всхожесть в лучшем случае составляет 30-40 %. В дальнейшем, значительная часть ослабленных проростков погибает или имеет замедленные темпы роста, что существенно сказывается на продуктивности посевов [3]. Наилучший результат в устранении этой проблемы достигается при обогащении посевного материала микроэлементами [4, 6, 9]. Этот агроприем позволяет повысить полевую всхо-

жесть семян риса на 5-7 %, снизить полегаемость растений на 20-30, стерильность колосков на 2-4, увеличить коэффициенты использования элементов питания из удобрений в среднем на 5-10 %, повысить устойчивость растений к неблагоприятным факторам окружающей среды [7, 10]. Предпосевная обработка семян риса различными микроэлементами повышает урожайность зерна в среднем на 4,5-7,0 ц/га. Наиболее эффективные концентрации рабочего раствора: для бора, кобальта, молибдена, меди – 0,5 %, для цинка и марганца – 1,0 %. Использование таких концентраций обеспечивает получение стабильных по годам прибавок урожая, хотя в отдельные годы не исключена возможность высокой эффективности других концентраций [7].

Почвы Кубани, в том числе рисосеющих районов, содержат достаточное для жизнедеятельности растений количество микроэлементов. Однако при длительном