

ПОТОКИ АЗОТА И ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГРОЭКОСИСТЕМЫ В ПОСЕВАХ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

А.А. Алферов, д.б.н., Л.С. Чернова, к.с.-х.н.,
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии
имени Д.Н. Прянишникова»,
127434, Москва, ул. Прянишникова, 31а, E-mail: alferov72@yandex.ru

Представлены результаты 11-летних исследований в микрополевых опытах с использованием меченого ^{15}N азотного удобрения на яровой пшенице, возделываемой на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при применении биопрепарата на основе азотфиксирующих агробактерий (*Agrobacterium radiobacter*, штамм 204). Изучены потоки азота в системе удобрение – почва – растения. В структуре баланса азота меченого минерального удобрения определены размеры иммобилизации, которые составляли 27-30%. Установлено, что инокуляция семян Ризоагрином (РА) не оказывает существенного влияния на иммобилизацию азота минерального удобрения. Величина газообразных потерь азота минерального удобрения по фону РК составляет 33% от внесенного и уменьшается до 29% при инокуляции семян Ризоагрином. Интегральная оценка состояния агроэкосистемы показала, что на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве система функционировала в режиме резистентности при применении минерального азотного удобрения и РА. Установлена зависимость показателя урожайности зерна (РИ: М, %), выражаемая уравнением регрессии $y = -0,07x^2 + 10,38x - 65,56$, при $R=0,78$.

Определено, что прибавка урожайности от внесения N_{45} составляет не менее 26%, от инокуляции семян ризоагрином – 10, от совместного их применения – 37%. Коэффициент использования яровой пшеницей меченого азота из аммиачной селитры в среднем равен 40%.

Ключевые слова: яровая пшеница, Ризоагрин, микробные биопрепараты, азотные удобрения, масса зерна, устойчивость агроэкосистемы.

Для цитирования: Алферов А.А., Чернова Л.С. Потоки азота и изменение режима функционирования агроэкосистемы в посевах яровой пшеницы // Плодородие. – 2021. – №6. – С. 69-71. DOI: 10.25680/S19948603.2021.123.19.

Познание минерализационно-иммобилизационной оборачиваемости азота в почве важно для понимания его внутрипочвенных циклов 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) [1-4].

Зависимость агроэкосистем от природных и антропогенных факторов обуславливает их реакцию на изменение среды и влияет на формирование режимов функционирования. Вследствие этого рациональное управление агроэкосистемами возможно при экологически обоснованном нормировании уровней антропогенных воздействий. Наибольший интерес для агроэкосистемы представляют параметры, связанные с гомеостатическим механизмом регуляции, что наиболее перспективно с такой функцией почв как поддержание биогеохимического круговорота веществ, в частности азота [3]. Это особенно важно для установления влияния функционирования агроэкосистемы на продуктивность сельскохозяйственных культур.

Цель исследований – определить параметры функционирования агроэкосистемы и круговорота азота удобрения, почвенного и ассоциативного азота в агрофитоценозе под яровой пшеницей при внесении меченого ^{15}N азотного удобрения (Na) на дерново-подзолистой почве.

Методика. Изучение действия биопрепарата Ризоагрин на баланс азота, режимы функционирования агроэкосистемы и выявление роли различных источников

азотного питания растений в формировании урожая яровой пшеницы проводили в микрополевым опыте по схеме, включающей два фона минерального питания растений: фосфорно-калийный и азотно-фосфорно-калийный. На обоих фонах проводили посев семенами, инокулированными биопрепаратом ризосферных бактерий. Микрополевой опыт продолжался с 1996 по 2018 г. Почва – дерново-подзолистая легкосуглинистая Смоленской и Московской областей 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. Опыт закладывали в сосудах без дна площадью 0,018 м². Повторность опыта – четырехкратная. Яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорта Злата, предшественники картофеля и гречиха. Минеральные удобрения вносили при набивке сосудов почвой. В качестве азотного удобрения использовали меченое удобрение в виде соли $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ с обогащением 54,04 ат.% в дозе 81 мг/сосуд, что соответствует 45 кг N/га. В качестве фона применяли суперфосфат двойной и хлористый калий в дозах $\text{P}_{60}\text{K}_{60}$. Семена яровой пшеницы в день посева обрабатывали биопрепаратом Ризоагрин (РА), созданным на основе штамма 204, относящегося к роду *Agrobacterium radiobacter*.

Расчет баланса и потоков почвенного азота в системе почва – микроорганизмы – удобрения – растения – атмосфера на основании полученных с применением изотопа ^{15}N данных и применения принципа пропорциональности в распределении меченого и минерализованного почвенного азота осуществляли по [1, 3]. Статистический анализ экспериментальных данных проводили дисперсионным методом по модели двухфакторного полевого опыта с использованием про-

грамм EXCEL и STAT VNIA. Достоверность различий оценивали по *F*-критерию Фишера.

Результаты и их обсуждение. Эффективное использование азота удобрения возделываемыми культурами играет определяющую роль в сохранении плодородия почвы, получении экологически безопасной продукции и охране окружающей среды. Чем лучше растения поглощают азот удобрения и азот почвы и активнее усваивают его, тем выше агрохимическая эффективность применения удобрений и ниже экологическая напряженность в агроэкосистеме [5]. В системе критериев, характеризующих режим азотного питания растений в онтогенезе, агрохимическую эффективность и экологическую рациональность применяемых азотных удобрений, важным показателем является величина потребления азота [6]. Многолетние исследования показали, что на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве на фоне применения фосфорных и калийных удобрений потребление азота яровой пшеницей составило 7,95 г/м² (табл. 1). Улучшение азотного питания растений за счет применения

Ризоагрина и аммиачной селитры способствовало повышению потребления азота на 11 и 38% соответственно. Инокуляция семян РА и внесение азотного удобрения повышало вынос азота на 47%. Установленный более высокий вынос азота с урожаем зерна пшеницы, удобренной азотом, по сравнению с растениями на неудобренных делянках, связан с тем, что применение минеральных азотных удобрений приводит одновременно к более интенсивному использованию растениями почвенного азота – «экстра»-азота [7, 8]. Величина «экстра»-азота может достигать значительных размеров и в некоторых случаях превышает применяемую дозу азота удобрения [5]. В наших исследованиях доля «экстра»-азота составила 11%, что меньше количества азота удобрения, потребленного яровой пшеницей. Вместе с тем, необходимо отметить, что основную роль в обеспечении растений азотом на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при невысоких дозах азотных удобрений (N₄₅) играет азот почвы, поскольку 84% от общего количества потребления N растением составляет азот почвы.

1. Потребление азота удобрения и почвы яровой пшеницы

Вариант опыта	Общий вынос N, г/м ²	N удобрения		N почвы		Экстра-азот		Ассоциативный N, г/м ²
		1	2	1	2	1	2	
P ₆₀ K ₆₀ – фон (Ф)	7,95	–	–	7,95	100	–	–	–
Ф + Ризоагрин (РА)	8,94	–	–	8,94	100	–	–	0,99
Ф + N ₄₅	10,95	1,80	16	9,15	84	1,20	11	–
Ф + N ₄₅ + РА	11,68	1,84	16	9,84	84	0,90	8	0,69
P, %	3							
HCP ₀₅ , г/м ²	0,47							

Примечание. В графе 1 – г/м², в графе 2 – % (здесь и в табл. 2).

Одна из задач исследований – определение размеров ассоциативной азотфиксации в посевах сельскохозяйственных растений. В среднем за 11 лет исследований инокуляция семян Ризоагрином обеспечила фиксацию 1,0 г/м² азота воздуха в посевах яровой пшеницы. Применение азотных удобрений незначительно уменьшало размеры накопления ассоциативного азота.

Баланс азота удобрений в почве складывается из использования его растениями, закрепления в почве и из потерь (газообразных и водно-миграционных). Применение в исследованиях удобрений, меченных изотопом ¹⁵N, позволило количественно определить статьи баланса азота удобрения (табл. 2).

2. Потоки и баланс азота удобрений при выращивании яровой пшеницы

Вариант опыта	Использовано растениями N		Закреплено в 20 см слое почвы		Потери из 20 см слоя почвы	
	1	2	1	2	1	2
P ₆₀ K ₆₀ + N ₄₅	1,80	40	1,20	27	1,50	33
P ₆₀ K ₆₀ + N ₄₅ + РА	1,84	41	1,35	30	1,31	29

P, % = 3, HCP₀₅ = 0,04 г/м²

При инокуляции семян РА отмечена положительная тенденция к увеличению его использования на формирование урожая яровой пшеницы. Закрепление в 20-сантиметровом слое почвы увеличилось, потери азота, относящиеся преимущественно к газообразным формам, снизились с 33 до 29%.

Использование изотопа ¹⁵N при изучении агроэкосистем с разными уровнями применения агрохимикатов позволило выявить особенности формирования потоков азота удобрений и почвы. Это особенно важно при выяснении негативных изменений в функционировании каждого компонента в отдельности и агроэкосистемы в целом. Для оценки устойчивости агроэкосистем при выращивании зерновых культур используют показатели круговорота азота удобрения и почвенного азота в системе почва–растение [9]. Потоки азота при выращивании яровой пшеницы характеризовались следующими параметрами (табл. 3): доля нетто-минерализованного азота (Н – М) составила 72%, а реиммобилизованного почвенного азота (РИ) – 28%. При инокуляции яровой пшеницы Ризоагрином возрастало количество минерализованного азота почвы (М) на 16%, нетто-минерализованного – на 12, реиммобилизованного – на 22%.

3. Показатели интегральной оценки функционирования системы почва–растение при выращивании яровой пшеницы

Показатель	Фон + N ₄₅	
	Без инокуляции	Инокуляция
Минерализованный азот (М), г/м ²	26,2	30,3
Нетто-минерализованный азот (Н – М), г/м ²	18,9	21,2
Реиммобилизованный азот (РИ), г/м ²	7,4	9,0
РИ : М, %	28	30
Н – М : РИ	2,6	2,3

Оценка влияния такого показателя устойчивости агроэкосистемы как соотношение реиммобилизованного азота к минерализованному (РИ : М, %), позволяет охарактеризовать сбалансированность потоков азота – нетто-минерализованного и (ре)иммобилизованного, что важно

для определения степени участия азота минерального удобрения в продукционном процессе яровой пшеницы. По данным опыта, на фоне применения азотного удобрения и РА при увеличении отношения РИ : М, возрастает продуктивность яровой пшеницы. Это подтверждает

ся уравнением регрессии с высокой теснотой корреляционной связи между изучаемыми величинами:

$$y = -0,07x^2 + 10,38x - 65,56, R=0,78, t_R > t_{\alpha} \quad (1)$$

где y – масса зерна яровой пшеницы, г/м²; x – отношение РИ: М, %; R – коэффициент корреляции.

Итогом оценки применения любого агротехнологического приема является его влияние на продуктивность сельскохозяйственных культур. Изменение урожайности зерна яровой пшеницы определялось азотным режимом почв и особенностями потребления азота растениями. В среднем за годы исследований на фоне

применения фосфорных и калийных удобрений масса зерна яровой пшеницы сорта Злата составляла 243 г/м² (табл. 4). Наибольший урожай зерна яровая пшеница формировала при внесении азотных удобрений и инокуляции семян биопрепаратом Ризоагрин, который на 37% превышал контроль. Применение азотного удобрения также увеличивало и долю хозяйственного урожая культуры ($K_{хоз}$ возрастал с 0,37 до 0,41). Многолетние исследования применения биопрепарата и азотного удобрения показали, что эффективность Ризоагрина уступает действию аммиачной селитры в дозе N_{45} .

4. Эффективность применения удобрений и Ризоагрина на яровой пшенице (в среднем за 11 лет)

Вариант опыта	Масса зерна, г	$K_{хоз}$	Прибавка зерна к контролю		Содержание N, %		Азотный индекс
			г/м ²	%	зерно	солома	
$P_{60}K_{60}$ – фон (Ф)	243	0,37	–	–	2,34	0,57	0,70
Ф + Ризоагрин (РА)	268	0,39	25	10	2,37	0,63	0,71
Ф + N_{45}	305	0,41	62	26	2,62	0,68	0,73
Фон + N_{45} + РА	334	0,42	91	37	2,62	0,64	0,75
$P, \%$	4,13	3,22	4,13		2,53	2,71	
НСР ₀₅ : А – удобрение	8	0,02	8		0,06	0,03	
В – биопрепарат	14	0,02	14		0,03	0,02	
частных различий	31	0,03	31		0,07	0,05	

Примечание. $K_{хоз}$ – хозяйственный коэффициент.

Содержание азота в зерне пшеницы подвержено большой изменчивости и зависит от условий выращивания (модификационная изменчивость) и наследственных (генотипических) особенностей [10]. Установлено, что улучшение условий азотного питания яровой пшеницы за счет внесения азотного удобрения увеличивало содержание азота в зерне на 0,28%. При инокуляции семян РА отмечали только положительную тенденцию к повышению концентрации N в зерне.

Азотный индекс определяет способность генотипа к «перекачиванию» этого элемента питания в зерно, т. е. это доля азота в зерне в общем биологическом потреблении. Обычно этот показатель зависит от генетических особенностей культурного растения и в меньшей степени – от условий минерального питания, даже незначительное его увеличение можно рассматривать как положительный фактор [11]. Варьирование азотного индекса (локализация азота в зерне) определялось условиями минерального питания. Под действием азотного удобрения и Ризоагрина он возрастал с 0,70 до 0,75.

Выводы. В результате проведенных исследований определены параметры круговорота азота удобрения и азота почвы при инокуляции яровой пшеницы микробным препаратом на основе азотфиксирующих агробактерий *Agrobacterium radiobacter* шт. 204. При возделывании яровой пшеницы коэффициент использования (КИ) ¹⁵N аммиачной селитры составил в среднем 40% от внесенного количества. Относительные размеры иммобилизации в структуре баланса азота минерального удобрения составляли 27-30%. Инокуляция семян яровой пшеницы Ризоагрином не оказывает значительного влияния на иммобилизацию азота минерального удобрения.

NITROGEN FLOWS AND CHANGES IN THE MODE OF FUNCTIONING OF THE AGROECOSYSTEM IN SPRING WHEAT CROPS

A.A. Alferov, L.S. Chernova

Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry, Pryanishnikov ul., 31a., Moscow, 127434, Russia, E-mail: alferov72@yandex.ru
The article presents the results of 11 years of research in microfield experiments using ¹⁵N labeled nitrogen fertilizer on spring wheat cultivated on sod-podzolic light loamy soil when using a biological product based on nitrogenfixing agrobacteria (*Agrobacterium radiobacter* strain 204). Nitrogen fluxes in the fertilizer–soil–plants system have been studied. In the structure of the nitrogen balance of labeled mineral fertilizer, the size of immobilization was determined, which amounted to 27-30%. It was found that inoculation of seeds with Rhizoagrin (RA) has no significant effect on the immobilization of nitrogen of mineral fertilizer. The amount of gaseous nitrogen losses of mineral fertilizer on the background of the RK is 33% of the introduced and decreases to 29% when inoculating seeds with Rhizoagrin. An integral assessment of the state of the agroecosystem showed that on sod-podzolic light loamy soil, the system functioned in a resistance mode when using mineral nitrogen fertilizer and RA. The dependence of the grain yield index on (RI : M, %) expressed by the regression equation $y = -0,07x^2 + 10,38x - 65,56$, with $R = 0,78$, is established. It was determined that the increase in yield from the introduction of N_{45} is at least 26%, from the inoculation of seeds with rhizoagrin – 10%, from their joint use – 37%. The utilization rate of labeled nitrogen from ammonium nitrate by spring wheat is on average 40%.

Key words: spring wheat, Rhizoagrin, biopreparations, nitrogen fertilizers, grain weight, sustainability of the agroecosystem

Газообразные потери меченого азота минерального удобрения составляли 33% от внесенного по фону РК и уменьшались при применении Ризоагрина до 29%.

На дерново-подзолистой легкосуглинистой почве со средним содержанием гумуса ведущая роль в повышении урожайности зерна яровой пшеницы принадлежит минеральным удобрениям, прибавка от внесения N_{45} составляет не менее 26%, от инокуляции семян Ризоагрином – 10, при совместном их применении – 37%.

Литература

1. Помазкина Л.В., Котова Л.Г., Зорина С.Ю., Рыбакова А.В. Сравнительная оценка состояния агроэкосистем на разных типах почв Прибайкалья, загрязненных фторидами алюминийного производства // Почвоведение. – 2008. – № 6. – С. 717-725.
2. Сычев, В.Г., Соколов О.А., Завалин А.А., Шмырева Н.Я. Роль азота в интенсификации продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Т. 2. Экологические аспекты роли азота в продукционном процессе. – М.: ВНИИА, 2012. – 272 с.
3. Помазкина Л.В. Новый интегральный подход к оценке режимов функционирования агроэкосистем и экологическому нормированию антропогенной нагрузки, включая техногенное загрязнение почв // Успехи современной биологии. – 2004. – Т. 124. – № 1. – С. 66-76.
4. Соколов, О.А., Шмырева Н.Я. Показатели циклов азота и устойчивость агроэкосистем в условиях склона // Плодородие. – 2009. – № 3. – С. 4-6.
5. Завалин А.А., Соколов О.А. Поток азота в агроэкосистеме: от идеи Д.Н. Прянишникова до наших дней. – М.: ВНИИА, 2016. – 591 с.
6. Завалин А.А., Соколов О.А. Коэффициент использования растениями азота удобрений и его регулирование // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2019. – №4. – С. 71–75.
7. Yan M., Pan G., Lavalley J., Conant R. Rethinking sources of nitrogen to cereal crops // Global Change Biology. – 2020. – Volume 26. – № 1. – P. 191-199.
8. Bosatta E., Ågren G.I. Theoretical analyses of interactions between inorganic nitrogen and soil organic matter // European Journal of Soil Science. – 1995. – Volume 46. – № 1. – P. 109-114.
9. Соколов О.А., Завалин А.А., Шмырева Н.Я., Черников В.А. Экологическая устойчивость многолетних бобово-злаковых трав второго года жизни в эрозийном агроландшафте // Проблемы агрохимии и экологии. – 2020. – № 1. – С. 3-7.
10. Завалин А.А., Соколов О.А. Азот и качество зерна пшеницы // Плодородие. – 2018. – № 1. – С. 14-17.
11. Алферов А.А., Чернова Л.С., Завалин А.А. Эффективность применения эндофитных биопрепаратов и азотного удобрения // Вестник сельскохозяйственной науки. – 2017. – №5. – С. 21 – 24.