

## Почвоведение

УДК 633.11 + 631.811

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019335-37>

## УСТОЙЧИВОСТЬ АГРОЭКОСИСТЕМЫ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ И БИОПРЕПАРАТОВ\*

А.А. Алферов, Л.С. Чернова, кандидаты сельскохозяйственных наук

Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии  
имени Д.Н. Прянишникова, 127550, Москва, ул. Прянишникова, 31 а  
E-mail: alferov72@yandex.ru

Проведен микрополевой опыт на дерново-подзолистой почве по изучению влияния удобрений и биопрепарата Ризоагрин на использование растениями биологического азота, азота удобрений и почвы, устойчивость агроэкосистемы. Показано, что формирование биомассы яровой пшеницы осуществляется в основном за счет почвенного азота, доля которого достигает 4/5 общего выноса элемента при применении минеральных удобрений. Инокуляция семян Ризоагрином увеличивала коэффициент использования азота удобрений на 4,5%, снижала его потери на 7%, при этом отмечена некоторая тенденция повышения иммобилизации N удобрения. Устойчивость агроэкосистемы характеризуется потоками азота. В течение вегетационного периода яровой пшеницы количество минерализованного азота в зависимости от удобрений достигало 17,4-18,0 г/м<sup>2</sup>, в то время как сумма реимобилизованного азота – 4,4-4,9 г/м<sup>2</sup>, нетто-минерализованного – 13,1 г/м<sup>2</sup>. Инокуляция семян биопрепаратом существенно не влияла на процессы минерализации и реимобилизации в почве, выявлена только положительная тенденция их усиления. Отмечено, что в условиях применения азотных удобрений агроэкосистема функционирует в режиме резистентности (предельно допустимый уровень воздействия) (РИ : М = 25%, Н – М : РИ = 3,0). В среднем за годы исследований инокуляция семян Ризоагрином существенно не изменяла показатели устойчивости агроэкосистемы при внесении удобрений.

## SUSTAINABILITY OF THE AGROECOSYSTEM IN THE APPLICATION OF FERTILIZERS AND BIOPREPARATIONS

Alferov A.A., Chernova L.S.

Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut agroximii im. D.N. Pryanishnikova,  
127550, Moskva, ul. Pryanishnikova, 31 а  
E-mail: alferov72@yandex.ru

The formation of biomass of spring wheat on sod-podzolic soil is mainly due to soil nitrogen, the share of which reaches 4/5 of the total removal of the element when using mineral fertilizers. Inoculation increases the nitrogen content of fertilizers by 4.5%, reduces losses by 7%; there is some tendency to increase the immobilization of N fertilizers. The sustainability of the agroecosystem is characterized by nitrogen flows. During the growing season of spring wheat, the amount of mineralized nitrogen depending on the fertilizer reached 17.4-18.0 g/m<sup>2</sup>, while the amount of remobilized nitrogen was 4.4-4.9 g/m<sup>2</sup>, net-mineralization (N-M) – 13.1 g/m<sup>2</sup>. The inoculation of RA seeds does not significantly affect the processes of mineralization (M) and remobilization (RI), only a positive trend of growth of mineralization and remobilization of nitrogen in the soil is observed. The use of nitrogen fertilizer leads agroecosystem in a resistant state-the zone of the maximum permissible level of exposure (RI:M=25%, N-M:RI=3.0). On average, over the years of research, inoculation of RA seeds does not change the indicators of sustainability of agroecosystem when applying fertilizers.

**Ключевые слова:** яровая пшеница, Ризоагрин, азотное удобрение, устойчивость агроэкосистемы

**Key words:** spring wheat, Rhyzoagrin, nitrogen fertilizer, sustainability of agroecosystem

В существующих экосистемах биосферная функция почв в основном связана с формированием биогеохимических циклов элементов питания – азота и углерода [1]. Исследование их особенно важно в агроэкосистемах, которые испытывают постоянное антропогенное воздействие в конкретных почвенно-климатических условиях [2]. Антропогенный фактор в агроэкосистеме реализуется в виде непосредственного воздействия на ее структуру, пищевые цепи, круговороты энергии и питательных веществ, в результате изменяются режимы в почве, численность и видовое разнообразие растений и микроорганизмов, а сама агроэкосистема приобретает ряд специфических характеристик, свойственных конкретному типу хозяйственной деятельности человека [3-5]. Экспериментальные исследования, оценивающие функционирование, состояние и устойчивость не только отдельных компонентов, но и в целом агроэкосистемы – немногочисленны и посвящены в основном вопросам загрязнения почв [6-10].

Цель настоящей работы – определить влияние удобрений и биопрепаратов ризосферных diaзотрофов на использование растениями биологического азота, N

удобрений и почвы, устойчивость агроэкосистемы.

**Методика.** Действие биопрепарата ризосферных diaзотрофов на баланс азота и роль различных источников азотного питания растений в формировании урожая яровой пшеницы изучали в микрополевом опыте по схеме, представленной в табл. 1. Высевали инокулированные биопрепаратом ризосферных бактерий семена яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Злата [11]. Микрополевой опыт проводили в 2014-2018 гг. в сосудах без дна площадью 0,018 м<sup>2</sup> на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве Смоленской области со следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса (по Тюрину) – 1,98-2,04%; рН<sub>KCl</sub> 5,1-5,2; содержание подвижных форм P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O (по Кирсанову) – соответственно 57,6-67,8 и 153,1-161,4 мг/кг почвы; повторность опыта – 4-кратная. Предшественником яровой пшеницы был картофель. Минеральные удобрения вносили при набивке сосудов почвой. В качестве азотного удобрения использовали меченое удобрение в виде соли <sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>15</sup>NO<sub>3</sub> с обогащением 54,04 ат. % в дозе 81 мг/сосуд, что соответствует 45 кг N/га. В качестве фона применяли суперфосфат двойной и

\* Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 18-016-00200.

хлористый калий в дозах P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>. Семена яровой пшеницы в день посева обрабатывали биопрепаратом Ризоагрин, созданным на основе штамма 204, относящегося к роду *Agrobacterium radiobacter*.

Для расчета баланса и потоков почвенного азота в системе почва – микроорганизмы – удобрения – растения – атмосфера использовали полученные с применением изотопа <sup>15</sup>N данные, основываясь на пропорциональности в распределении меченого и минерализовавшегося почвенного азота [1, 12]. Расчеты проводили по формулам:

$$N_c = N_a \cdot {}^{15}N_c : {}^{15}N_a; \quad N_d = N_a \cdot {}^{15}N_d : {}^{15}N_a;$$

$$M = N_a + N_b + N_c + N_d; \quad H-M = N_a + N_b + N_d;$$

$$PI = M - H-M,$$

где потоки азота: а – использование растениями, b – остаточный минеральный в почве, с – иммобилизованный, d – потери, M – минерализовавшийся, H-M – нетто-минерализованный, PI – реиммобилизованный.

Погодные условия различались по годам исследования. Большая часть вегетационного периода 2014 г. характеризовалась повышенной температурой воздуха и крайне неравномерным распределением атмосферных осадков с чередованием периодов засушливой погоды и выпадением ливневых осадков, гидротермический коэффициент (ГТК) составил 1,33. Вегетационный период 2015 г. по количеству осадков был засушливым с температурой воздуха выше среднегодового значения, ГТК составил 0,64. В 2016 г. температура воздуха была на 1,0°С выше климатической нормы при значительном выпадении осадков, ГТК = 1,63. Вегетационный период 2017 г. отмечен недостаточным выпадением осадков при температуре выше климатической нормы, в 2018 г. – неравномерным распределением осадков – недостатком в мае, августе и существенным избытком в июле (267% к месячной норме) при среднемесячной температуре периода вегетации на 1,1°С выше климатической нормы, ГТК = 1,72.

**Результаты и обсуждение.** Определение концентрации общего азота в зерне и соломе позволило рассчитать его накопление, а изотопный анализ азота – установить его источники, участвующие в формировании урожая [5, 13]. На РК-фоне урожай яровой пшеницы (масса зерна + масса соломы) формировался только за счет почвенного азота. При внесении N-удобрения общий вынос азота урожаем, включающий азот почвы и азот удобрения, увеличился на 57% (табл. 1). Инокуляция семян Ризоагрином способствовала повышению накопления общего азота на 17% по сравнению с РК-фоном и на 4,5% – коэффициента его использования растениями из N-удобрения на формирование урожая. При внесении N-удобрения в результате деятельности почвенных микроорганизмов происходят процессы минерализации органического вещества, приводящие к образованию «экстра»-N [5, 14], который также используется растениями на формирование урожая. Применение изотопа <sup>15</sup>N позволило вычлнить долю «экстра»-N, который составляет 13% при внесении N-удобрения и 12% – N-удобрения + ризоагрин от общего выноса.

За счет инокуляции семян Ризоагрином доля дополнительного азота в формировании урожая пшеницы достигла 17%, а при посеве инокулированными биопрепаратом семенами на фоне N-удобрения – 21%.

Одна из важных задач исследования состояла в

**Табл. 1. Потребление азота удобрений и почвы яровой пшеницей**

Вариант	Общий вынос, г/м <sup>2</sup>	В том числе N				Дополнительный N		КИАУ %
		удобрения		почвы		г/м <sup>2</sup>	%	
		г/м <sup>2</sup>	%	г/м <sup>2</sup>	%			
P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> (фон)	5,3	–	–	5,3	100	–	–	–
Фон + N <sub>45</sub>	8,3	1,9	23	6,4	77	1,1	13	42,2
Фон + Ризоагрин	6,4	–	–	6,4	100	1,1	17	–
Фон + N <sub>45</sub> + Ризоагрин	9,4	2,1	22	7,3	78	2,0	21	46,7

\*КИАУ – коэффициент использования азота удобрений.

определении размеров ассоциативной азотфиксации в посевах культурного растения. Применение модифицированного разностного метода с использованием <sup>15</sup>N в удобрениях позволило вычислить количество азота, фиксированного *Agrobacterium radiobacter* (штамм 204) (Ризоагрин) в дерново-подзолистой почве. В среднем инокуляция семян биопрепаратом в посевах яровой пшеницы обеспечила фиксацию 1,1 г/м<sup>2</sup> азота воздуха. Применение азотных удобрений существенно не влияло на уменьшение размеров использования ассоциативного азота (0,9 г/м<sup>2</sup>).

Баланс азота применяемых удобрений (табл. 2) в среднем за годы исследований складывался следующим образом. Растения яровой пшеницы использовали около 42% азота аммиачной селитры. В слое почвы 0-20 см иммобилизовалось 29% NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>. Существенной статьей баланса азота являются его потери. Потери азота из почвы в газообразной форме и при вымывании в нижележащие слои – основная причина снижения коэффициента использования азота растениями и эффективности удобрений во всех климатических зонах страны [5, 14, 15]. В нашем опыте неучтенные потери азота удобрений при вымывании в нижележащие слои почвы и газообразные потери (молекулярный азот, его окислы и аммиак) составили 31%.

**Табл. 2. Баланс азота удобрений при выращивании яровой пшеницы**

Вариант	Использовано растениями N	Закреплено в слое почвы 20 см	Потери из слоя почвы 20 см
P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> + N <sub>45</sub>	1,9/42,2	1,2/26,7	1,4/31,1
P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> + N <sub>45</sub> + Ризоагрин	2,1/46,7	1,3/28,9	1,1/24,4

При инокуляции семян Ризоагрином на 4,5% возросло использование азота из N<sub>45</sub> на формирование урожая яровой пшеницы, почти не изменялось его закрепление в 20-сантиметровом слое почвы и снижались с 31 до 24% потери азота, относящиеся преимущественно к газообразным формам [5, 16].

Системный анализ трансформации почвенного азота выявил, что режим функционирования агроэкосистемы при применении удобрений и Ризоагрина зависит от сбалансированности потоков нетто-минерализованного (H-M) и (ре)иммобилизованного (PI) азота в пуле минерализованного азота почвы (M). В результате исследований с применением изотопа <sup>15</sup>N выявлены потоки азота удобрения и почвы (табл. 3). За вегетацию количество минерализованного почвенного азота составило 17,4 г/м<sup>2</sup>, при этом содержание реим-

мобилизованного азота – 4,3 г/м<sup>2</sup>. Инокуляция семян биопрепаратом существенно не влияла на процессы минерализации и реиммобилизации, отмечена только положительная тенденция их усиления (3,5% минерализации и 14,0% иммобилизации).

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

Показатель	P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> +N <sub>45</sub>	
	без инокуляции	инокуляция
Минерализованный азот, г/м <sup>2</sup>	17,4	18,0
Нетто-минерализованный азот, г/м <sup>2</sup>	13,1	13,1
Реиммобилизованный азот, г/м <sup>2</sup>	4,3	4,9
РИ : М, %	24,7	27,2
Н – М : РИ	3,0	2,7

Использование интегральной оценки показало, что на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве агроэкосистема функционирует в режиме резистентности (уровень воздействия – предельно допустимый) при применении аммиачной селитры (РИ : М = 25%, Н – М : РИ = 3,0), в то время как при использовании Ризоагрина отмечена только тенденция повышения ее устойчивости.

На устойчивость агроэкосистемы при использовании удобрений оказывают действие метеорологические условия во время выращивания яровой пшеницы. Устойчивость агроэкосистемы, или ее способность сохранять структуру и функции (показатель РИ : М, %) в изменяющихся метеорологических условиях при внесении азотного удобрения, была выше при оптимальных температуре воздуха и влажности (ГТК=1,0-1,2). Как засушливые (ГТК < 0,9), так и влажные (ГТК > 1,6) погодные условия снижали устойчивость агроэкосистемы, что подтверждается уравнением регрессии – сильной по тесноте связи и криволинейной по форме:

$$Y = -27,348x^2 + 47,768x + 15,352, r_{yx} = 0,82, \quad (1)$$

где Y – отношение реиммобилизованного азота к количеству минерализованного, %; x – ГТК за вегетацию; r<sub>yx</sub> – коэффициент корреляции; n = 9.

При инокуляции семян Ризоагрином и применении N<sub>45</sub> зависимость сильно не изменялась:

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

Таким образом, 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, участие «экстра»-N в продукционном процессе ограничено (13% от общего выноса). Дополнительное использование азота яровой пшеницей в этих условиях за счет инокуляции семян биопрепаратом Ризоагрин составляет 9-11 кг/га.

Режим функционирования агроэкосистемы при применении азотного удобрения и Ризоагрина зависит от сбалансированности потоков нетто-минерализованного и (ре)иммобилизованного азота в почве. На дерново-подзолистой легкосуглинистой почве агроэ-

косистема функционирует в режиме резистентности (предельно допустимый).

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 связи и криволинейной по форме (r<sub>yx</sub> = 0,82, η > η).

**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 алюминиевого производства // Почвоведение. – 2008. – № 6. – С. 717-725.
2. Соколов О.А., Шмырева Н.Я., Завалин А.А., Черников В.А. Роль симбиотического азота и устойчивость его циклов при выращивании многолетних трав на склоне // Плодородие. – 2016. – № 1. – С. 50-52.
3. Сычев В.Г., Соколов О.А., Завалин А.А., Шмырева Н.Я. Роль азота в интенсификации продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Том 2. Экологические аспекты роли азота в продукционном процессе. – М.: ВНИИА, 2012. – 272 с.
4. Соколов О.А., Завалин А.А., Сычев В.Г., Шмырева Н.Я., Дуриков Л.Н. Потоки азота в агрофитоценозе на эродированных почвах. – М.: ВНИИА. – 2015. – 96 с.
5. Завалин А.А., Соколов О.А. Потоки азота в агроэкосистеме: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней. – М.: ВНИИА, 2016. – 591 с.
6. Помазкина Л.В., Соколова Л.Г., Зорина С.Ю., Ковалева Н.Н. Интегральная оценка экологической нагрузки на агроэкосистемы при техногенном загрязнении фторидами агроземов Байкальской природной территории // Агрохимия. – 2011. – № 11. – С. 78-84.
7. Соколов О.А., Шмырева Н.Я., Завалин А.А. Потоки азота при выращивании озимой ржи (*Secale Cereale* L.) на эродированных почвах (исследования с <sup>15</sup>N) // Проблемы агрохимии и экологии. – 2016. – № 3. – С. 44-47.
8. Соколов О.А., Черников В.А., Васенев И.И. Агроэкологическая оценка потерь азота в условиях эрозионного агроландшафта (по результатам длительного исследования с <sup>15</sup>N) // АгроЭкоИнфо. – 2015. – № 6. – URL: <http://www.Agroecoinfo.narod.ru/>.
9. Соколов О.А., Завалин А.А., Шмырева Н.Я., Черников В.А. Направленность потоков азота в агроэкосистеме на склоне при применении органических удобрений, меченных <sup>15</sup>N // Плодородие. – 2015. – № 6. – С. 36-38.
10. Помазкина Л.В. Оценка влияния климатических факторов и загрязнения аллювиальных почв тяжелыми металлами на функционирование агроэкосистем Байкальского региона // Агрохимия. – 2018. – № 4. – С. 78-87.
11. Оценка эффективности микробных препаратов в земледелии / под общ. ред. А.А. Завалина. – М.: РАС-ХН, 2000. – 82 с.
12. Помазкина Л.В. Новый интегральный подход к оценке режимов функционирования агроэкосистем и экологическому нормированию антропогенной нагрузки, включая техногенное загрязнение почв // Успехи современной биологии. – 2004. – Том. 124. – № 1. – С. 66-76.
13. Завалин А.А. Биопрепараты, удобрения и урожай. – М.: Изд-во ВНИИА, 2005. – 302 с.
14. Кореньков Д.А. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений. – М.: Агроконсалт, 1999. – 296 с.
15. Гамзиков Г.П. Агрохимия азота в агроценозах. – Новосибирск: Рос. акад. с.-х. наук, Сиб. отд-ние. Новосибир. гос. аграр. ун-т, 2013. – 790 с.
16. Stevens R., Laughlin R. Measurement of nitrous oxide emission from agricultural soils // Nutrient Cycling in Agroecosystems. – 2008. – V.52. – N2. – P/ 131-139.

Поступила в редакцию 12.02.19  
После доработки 06.03.19  
Принята к публикации 11.03.19