

УДК 633.1:631.84

УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И БАЛАНС АЗОТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НОРМ И СРОКА ПРИМЕНЕНИЯ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ

В. В. КИДИН, П. М. СМИРНОВ

(Кафедра агрономической и биологической химии)

Интенсификация сельскохозяйственного производства в значительной степени обусловлена целенаправленной химизацией земледелия и прежде всего увеличением количества применяемых минеральных удобрений и особенно азотных. По данным многочисленных опытов [1, 6, 7], проведенных в Нечерноземной зоне РСФСР, а также в условиях орошения, азотные удобрения обеспечивают около 60 % общей прибавки урожая, получаемой при внесении минеральных удобрений. Несмотря на быстрый рост производства азотных удобрений, поставки их еще не полностью обеспечивают потребность сельского хозяйства. В то же время по мере интенсификации сельскохозяйственного производства возникает опасность нарушения сложившегося экологического равновесия вследствие деградации отдельных компонентов окружающей среды, в частности в результате биологической и химической деструкции почвенного покрова, приводящей к существенному снижению плодородия почв.

В этой связи все большую актуальность приобретает всестороннее изучение процессов трансформации азота в системе почва — растение с целью разработки практических приемов, направленных на повышение эффективности азотных удобрений и уменьшение их негативного воздействия на окружающую среду.

В данной работе обобщены основные результаты проведенных нами исследований (в 1969—1984 гг.) путей трансформации азота удобрений в почве и использования его растениями с применением стабильного изотопа азота ^{15}N .

Микрополевые и вегетационные опыты проводили в основном на дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах. В вегетационных опытах использовались стеклянные или пластмассовые сосуды, вмещающие 3—6 кг воздушно-сухой почвы, в микрополевых — армированные полиэтиленовые сосуды без дна площадью 0,1 м². Более детально методика исследований описана в работах [2—4].

Применение меченных ^{15}N минеральных и органических удобрений позволило установить, что значительная часть (40—60 %) вносимого в почву азота не используется сельскохозяйственными растениями [2—4, 7, 8]. В зависимости от форм удобрений, норм, сроков и способов их внесения, биологических особенностей культур, а также климатических условий коэффициенты использования растениями азота удобрений могут варьировать в широких пределах: в полевых опытах — от 25 до 55 %, в вегетационных — от 30 до 65 %. Последнее свидетельствует о том, что уровень обеспеченности азотом, как правило, не соответствует потребности в данном элементе сельскохозяйственных культур. Диспропорция в наличии в почве азота и потребности растений в нем приводит к существенному снижению эффективности удобрений, что, в свою очередь, повышает опасность загрязнения окружающей среды окислами азота и нитратами [7]. В этой связи со-

здание оптимального уровня азотного питания растений для каждого конкретного случая варьирования факторов внешней среды дает возможность значительно повысить эффективность использования азотных удобрений.

В настоящее время широко дискутируется вопрос о влиянии почвенного плодородия на эффективность удобрений, в частности азотных [1, 5—7]. Не рассматривая дискуссионные материалы, хотелось бы отметить, что ответ на данный вопрос не может быть однозначным вследствие больших различий в условиях проведения опытов. Эффективность удобрений определяется не только общим уровнем почвенного плодородия, но и степенью обеспеченности растений элементами питания в от-

Т а б л и ц а 1

Баланс азота удобрений в дерново-подзолистых почвах в зависимости от их сельскохозяйственного использования и предшествующей удобренности (% от внесенного)

Показатели баланса	Целина	Варианты опыта, заложенного в 1912 г.			
		бессменный ячмень		севооборот	
		НРК	НРК+навоз	НРК	НРК+навоз
Использовано ячменем:					
в 1-й год (1974 г.)	44,2	45,5	48,7	43,1	44,0
за 2 года	40,5	39,4	40,9	39,7	39,0
за 3 года	40,0	38,9	40,0	39,6	39,6
Осталось в почве в минеральной форме:					
в 1-й год	0,3	0,3	0,6	0,3	0,3
за 2 года	0,5	0,7	0,8	0,7	0,5
за 3 года	0,4	0,7	0,7	0,2	0,3
Осталось в почве в органической форме:					
в 1-й год	24,9	16,8	15,1	26,4	26,1
за 2 года	19,7	15,1	15,7	21,2	20,4
за 3 года	17,5	14,8	14,5	18,5	18,7
Потери:					
в 1-й год	30,6	37,4	35,6	30,2	29,6
за 2 года	39,3	54,8	42,6	38,4	40,1
за 3 года	42,1	45,6	44,8	41,7	41,4

дельные периоды роста и развития. Так, низкое содержание в почве подвижных форм азота непременно будет являться (при прочих равных условиях) предпосылкой высокой отзывчивости сельскохозяйственных культур на внесение азотных удобрений подобно тому, как при одинаковом уровне в почве доступного растениям природного почвенного азота улучшение водно-физических свойств почвы и повышение содержания в ней других элементов также будут способствовать увеличению коэффициента использования азота удобрений. Следовательно, в зависимости от количества в почве природного азота, сбалансированности питания растений по макро- и микроэлементам, а также от соотношения целого ряда других факторов реальные коэффициенты использования азота удобрений сельскохозяйственными культурами могут колебаться в широких пределах и вряд ли следует ожидать наличия тесной корреляционной зависимости между ними и почвенным плодородием в целом без строгой дифференциации почв по обеспеченности азотом. Свидетельством этого могут служить данные, полученные в микрополевых опытах с дерново-подзолистой почвой длительного опыта ТСХА, заложенного в 1912 г. (табл. 1), и результаты микрополевых опытов с озимой пшеницей, проведенных на предкавказском черноземе в условиях Ставропольского края (табл. 2).

Анализируя табличный материал, можно сделать вывод, что коэффициенты использования азота удобрений, определенные изотопным методом, как на бедных дерново-подзолистых почвах с низким содер-

Баланс меченого ^{15}N азота аммиачной селитры в черноземе (% от внесенного)

Сроки и доза внесения азотных удобрений, кг/га			Используй- вано растения- ми	Осталось в почве			Дефицит азота в слое 0—30 см
до посева	ранней весной	в фазу цветения		в мине- ральной форме	в органи- ческой форме	всего	
60 ^{15}N	—	—	34,6	8,8	25,8	34,6	30,8
			43,2	2,0	26,1	28,1	28,7
—	60 ^{15}N	—	37,8	11,8	23,9	35,7	26,5
			49,5	2,5	28,3	30,8	19,7
—	—	60 ^{15}N	24,6	29,2	20,0	49,2	26,2
			29,6	29,1	13,7	42,8	27,6
120 ^{15}N	—	—	—	—	—	—	—
			36,4	8,2	22,8	31,0	32,6
60 ^{15}N	60 ^{15}N	—	31,4	20,3	21,7	42,0	26,6
			45,1	9,3	29,2	38,5	16,4
60 ^{14}N	—	60 ^{15}N	25,8	25,7	21,5	47,2	27,0
			27,3	25,9	16,4	42,3	30,4
—	60 ^{14}N	60 ^{15}N	23,9	27,1	22,7	49,8	26,3
			26,2	25,6	15,8	41,4	32,4
40 ^{15}N	40 ^{15}N	40 ^{15}N	33,2	16,8	23,6	40,4	26,4
			47,8	11,8	15,7	27,5	24,7

Примечание. В числителе — без орошения, в знаменателе — в условиях орошения.

жанием природного азота, так и на богатом гумусом черноземе были близкими (табл. 1 и 2). Не имели также существенных различий и другие статьи баланса азота при одних и тех же сроках внесения удобрений. В то же время коэффициенты использования азота удобрений, определяемые разностным методом (по разнице в выносе азота растениями на удобренном и неудобренном вариантах), урожайность культур на хорошо окультуренных почвах оказались выше вследствие дополнительной мобилизации азота почвы под влиянием удобрений [1, 3, 8].

Коэффициенты использования азота удобрений в пределах одной группы культур в значительной степени зависят от нормы и срока их внесения. В микрополевых и вегетационных опытах, проведенных в

Таблица 3

Коэффициенты использования азота ячменем (% от внесенного) при разных дозах и сроках внесения $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$

Доза азота (в микрополевых опытах — кг/га, в вегетационных — мг/кг)	Срок внесения азота					
	осенью	весной перед посевом	кущение	начало трубокования	конец трубокования	колошение
	Микрополевые опыты					
60	—	42,8	48,6	54,5	36,2	26,4
90	12,8	37,4	46,1	51,2	35,2	23,0
120	10,3	34,0	42,3	44,8	33,3	24,6
	Вегетационные опыты					
60	16,0	56,3	61,7	63,3	44,3	36,0
90	18,3	56,0	60,4	61,0	42,0	32,7
120	19,7	50,2	54,7	56,2	38,8	28,0

Примечание. Здесь и в табл. 4 приводятся данные в среднем по 2 микрополевым и 2 вегетационным опытам.

1978—1982 гг. на хорошо окультуренной дерново-подзолистой почве учхоза «Михайловское», с ячменем, отличающимся невысокой потребностью в азоте, при повышении дозы аммиачной селитры соответственно с 60 до 120 кг/га и с 60 до 120 мг/кг (по д. в.) коэффициенты использования его растениями заметно снижались до начала трубкования. К фазе колошения ячменя этот процесс был менее выражен из-за снижения общего размера использования растениями азота удобрения, внесенного в поздние сроки (табл. 3). Следует отметить, что увеличение коэффициентов использования азота при внесении удобрений в фазу трубкования не всегда сопровождается ростом урожая, особенно на малоплодородных почвах, вследствие длительного азотного голодания растений и уменьшения дополнительной мобилизации культурами азота почвы под влиянием удобрений (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Баланс азота аммиачной селитры в зависимости от дозы его внесения (%)

Доза ¹⁵ N (в микро- полевых опытах — кг/га, в вегетацион- ных — мг/га)	Использовано растениями	Осталось в почве		Всего учтено	Потери
		в минераль- ной форме	в органичес- кой форме		
Микрополевые опыты с кукурузой					
60	39,6	0,8	26,0	66,4	33,6
90	42,2	0,9	23,5	66,6	33,4
120	46,3	1,2	20,3	67,8	32,2
160	46,1	2,0	18,6	66,7	33,3
240	39,2	3,8	17,8	60,8	39,2
Вегетационные опыты с овсом					
20	40,8	1,0	28,0	69,8	30,2
40	45,5	1,4	23,5	70,4	29,6
60	52,7	1,9	18,6	73,2	26,8
80	60,6	2,0	15,3	77,9	22,1
100	56,2	3,3	14,5	74,0	26,0
120	51,0	4,0	15,9	70,9	29,1

Уменьшение коэффициентов использования азота ячменем при внесении высоких доз аммиачной селитры в микрополевых и вегетационных опытах является, по-видимому, следствием несбалансированного, избыточного азотного питания растений, приводящего к нарушению физиолого-биохимических процессов и изменению структуры урожая в результате диспропорционального развития вегетативных и репродуктивных органов растений [2].

В то же время доза азота, при которой наблюдается максимальный коэффициент его использования, как правило, далеко не предельна для повышения урожайности культур. При дальнейшем увеличении норм удобрений урожай возрастает, однако в агрономическом и экологическом аспектах это нерационально вследствие значительного снижения окупаемости азота прибавкой продукции и увеличения доли неиспользованного растениями азота, который непроизводительно теряется в газообразной форме или же вымывается в виде нитратов осадками.

В опытах с кукурузой внесение 120—160 N не было избыточным. Кукуруза по сравнению с ячменем отличается более высокой потребностью в азоте, следовательно, оптимальная норма азота для ее роста и развития намного выше.

Как небольшие дозы азота (60 кг/га), внесенного перед посевом, так и повышенные (240 кг/га) приводят к снижению размера его использования кукурузой в микрополевом опыте (табл. 4). Между тем при внесении оптимальной дозы азота (120—160 кг/га) коэффициенты этого элемента возрастали с 39 до 46 %. В вегетационных опытах использование азота удобрений овсом было наибольшим при внесении умеренной его дозы — 80 мг/кг. Повышение или снижение этой дозы приводило к резкому снижению использования азота растениями

(табл. 4). Такая закономерность, отмечаемая во многих опытах [1—4, 6], связана, по-видимому, с тем, что при небольших нормах удобрений, особенно при заблаговременном их применении, когда развитие растений только начинается, значительная часть азота трансформируется почвенной микрофлорой. В этом случае слабо развитая корневая система культурных растений не в состоянии конкурировать с многочисленными почвенными микроорганизмами, отличающимися большой динамичностью развития. В результате значительная часть вносимого азота удобрений не используется сельскохозяйственными растениями: 15—30 % закрепляется в почве в органической форме и 20—40 % теряется из почвы в газообразной форме (табл. 1—4).

Внесение всей нормы азота удобрений (табл. 3) или части его в хорошо окультуренную почву в виде подкормки в фазу кущения — начало трубкования для зерновых культур и в фазу 5—6 листьев для кукурузы [4] обусловило увеличение использования азота удобрений вследствие более высокой поглотительной и конкурентной способности корневой системы. Таким образом, коэффициенты использования азота минеральных удобрений возрастают при их внесении в период более интенсивного потребления азота растениями. Заблаговременное внесение удобрений (табл. 3), в равной степени как и слишком позднее, приводит к снижению доступности азота растениям, увеличению непроизводительных потерь, загрязнению рек, водоемов и атмосферы.

Поскольку период наиболее интенсивного потребления азота растениями определяется в основном их состоянием и фазой развития, то оптимальные сроки внесения азотных удобрений в отдельные годы в зависимости от погодных условий могут сильно варьировать. Общим здесь является то положение, что использование азота удобрений сельскохозяйственными культурами увеличивается по мере сокращения периода между внесением удобрений и началом интенсивного потребления азота растениями. Однако на слабоокультуренных почвах, а также на почвах с низким содержанием подвижного азота «перенесение» всей дозы азота с допосевого на более поздние сроки внесения чаще всего вызывает снижение эффективности азотных удобрений вследствие длительного голодания и слабого развития растений при недостатке азота в почве в начальные периоды их роста (табл. 2 и 5).

Таблица 5

Урожай ячменя (в числителе — г/сосуд) и коэффициент использования азота аммиачной селитры (в знаменателе — % от внесенного) в зависимости от окультуренности почвы

Исходное содержание минерального азота в почве, мг/кг	Срок внесения удобрения (60 мг ¹⁵ N на 1 кг)						молочная спелость
	до посева	кущение	трубкование			колошение	
			начало	середина	конец		
12	8,2	8,1	6,4	5,0	4,1	2,6	1,8
	55,8	58,0	53,4	48,7	33,6	25,2	20,5
25	10,2	11,6	12,6	12,2	8,8	5,7	4,3
	50,3	56,1	61,8	60,0	49,5	36,6	28,0
40	12,6	13,4	14,5	14,8	14,0	9,8	8,7
	42,5	44,3	46,2	49,4	48,0	35,3	31,6

Эффективность азотных удобрений, внесенных в разные сроки, обуславливается также содержанием подвижного азота в почве перед посевом и в течение вегетации растений. Этот вопрос нами изучался в условиях вегетационного опыта на почвах разной степени окультуренности. Перед закладкой опыта в почвах после 2-недельного компостирования определяли количество аммонийного и нитратного азота. В слабоокультуренной почве содержание минерального азота составило 12 мг/кг, в среднеокультуренной — 25, хорошо окультуренной — 40 мг/кг. В каче-

стве фона вносили фосфорно-калийные удобрения из расчета 200 мг P_2O_5 и K_2O на 1 кг. Известкование проводилось по полной гидролитической кислотности.

Результаты исследований (табл. 5) показали, что уровни предшествующего минерального питания растений оказывают существенное влияние на эффективность удобрений. При низком содержании минерального азота в почве азот удобрений лучше использовался растениями в случае внесения его перед посевом или же в ранние периоды развития сельскохозяйственных культур. Меньший эффект получен при более поздних сроках внесения аммиачной селитры вследствие слабой предшествующей обеспеченности азотом и плохого развития ячменя в начальные фазы развития. Последующее внесение удобрений не позволило исправить морфологические и физиологические изменения у растений, связанные с ранним дефицитом азота.

При среднем уровне минерального азота в почве (25 мг/кг), который в нашем опыте можно считать оптимальным, растения лучше использовали азот удобрений, вносимых в более поздние сроки — в фазу кушение — начало трубкавания. При высоком содержании доступного растениям азота в почве (40 мг/кг) коэффициенты использования азота удобрений практически во все сроки их внесения были меньше (табл. 5). Причем максимальный уровень использования азота удобрения в хорошо окультуренной почве наблюдался в более поздние сроки применения аммиачной селитры — в середине фазы трубкавания ячменя.

Наряду с использованием азота удобрений растениями часть его закрепляется в почве, а значительная часть теряется в процессе денитрификации. Имобилизация и непроизводительные потери азота удобрений находятся в прямой зависимости от его дозы. При повышении последней абсолютная величина закрепленного в почве азота увеличивается, а относительная — снижается. Результаты лизиметрических опытов показали, что применение более высоких доз удобрений приводит к росту газообразных потерь азота, а также потерь, связанных с вымыванием нитратов.

В зависимости от доз азота удобрений изменяется не только его баланс в системе почва — растение, но и структура урожая.

Результаты микрополевых опытов с озимой пшеницей Мироновской 808, проведенных на экспериментальной базе учхоза «Михайловское», показали, что структура урожая (отношение массы соломы к массе зерна) может служить диагностическим признаком оптимальной обеспеченности растений азотом. В опытах использовалась дерново-подзолистая старопашотная почва, утратившая плодородие вследствие длительного возделывания (с 1967 г.) сельскохозяйственных культур без удобрений и известки — рН 4,1, P_2O_5 и K_2O — соответственно 3,9 и 5,7 мг/100 г.

Т а б л и ц а 6

Структура урожая озимой пшеницы при разных дозах азота удобрений

Доза азота, кг/га	Исходная почва		45P45K+CaCO ₃		90P90K+CaCO ₃		135P135K+CaCO ₃	
	урожай зерна, ц/га	отношение массы соломы к массе зерна	урожай зерна, ц/га	отношение соломы к массе зерна	урожай зерна, ц/га	отношение массы соломы к массе зерна	урожай зерна, ц/га	отношение массы соломы к массе зерна
0	10,5	1,85	16,6	1,65	17,5	1,60	17,3	1,68
30	12,4	1,68	20,7	1,57	22,8	1,55	23,2	1,62
60	12,6	1,75	24,6	1,55	27,0	1,42	27,9	1,58
90	11,4	1,76	25,4	1,60	30,2	1,40	31,5	1,43
120	10,8	1,82	23,6	1,71	30,4	1,64	34,1	1,48
150	11,0	1,79	21,3	1,82	29,1	1,78	34,0	1,56
180	9,1	1,84	20,0	1,90	26,3	1,83	32,4	1,76
НСР ₀₅	1,22		1,48		1,81		1,67	

Из данных табл. 6 следует, что на слабокультуренной почве внесенный в ранневесеннюю подкормку азот аммиачной селитры не оказывал существенного влияния на урожайность озимой пшеницы. Отношение массы соломы к массе зерна варьировало от 1,68 до 1,85 и было минимальным при урожае зерна 12,4 ц/га. В результате применения азотных удобрений на известкованной почве и по возрастающему фосфорно-калийному фону урожай зерна озимой пшеницы увеличился в 1,5—3,0 раза. Причем наиболее благоприятное соотношение между массой соломы и зерна пшеницы во всех вариантах с фосфорно-калийными удобрениями отмечено при дозах азота, рассчитанных на получение максимального урожая (табл. 6).

Нарушение сбалансированности минерального питания растений приводило к снижению урожая и повышению доли нетоварной продукции. Так, на фоне 45Р45К наиболее узкое соотношение между массой соломы и зерна (1,55) наблюдалось при дозе азота 60 кг/га, урожай зерна составил 24,6 ц/га. Дальнейшее повышение дозы азота не оказывало существенного влияния на урожайность озимой пшеницы. При оптимальной дозе азота на более высоком фосфорно-калийном фоне отношение массы соломы к массе зерна было минимальным (1,40 и 1,43), урожайность озимой пшеницы — максимальной.

Заключение

Примечание меченого ^{15}N азота позволило установить коэффициенты использования его растениями в зависимости от дозы, срока и формы удобрений. В микролевых опытах сельскохозяйственными культурами использовалось в среднем 40 % азота удобрений, в лизиметрических — 45 и вегетационных — 50 %. Эффективность азотных удобрений, внесенных в разные фазы развития растений, зависит от уровня обеспеченности последних азотом почвы: чем выше содержание в почве доступного растениям природного азота, тем ниже коэффициент использования азота удобрений. Аналогичная зависимость отмечена при повышении нормы удобрений.

На почвах, обедненных азотом, внесение всей дозы удобрений в подкормку приводило к снижению урожайности и использования азота растениями. На хорошо окультуренной почве коэффициенты использования азота удобрений были наиболее высокими при внесении последних в период интенсивного потребления азота растениями — в фазу трубкования.

Структура урожая озимой пшеницы, которая менялась в зависимости от соотношения элементов питания в почве, может служить диагностическим признаком уровня обеспеченности растений тем или иным элементом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гамзиков Г. П. Азот в земледелии Западной Сибири. М.: Наука, 1981.
2. Кидин В. В. Взаимосвязь корневого и некорневого питания озимой пшеницы и ячменя. — Изв. ТСХА, 1976, вып. 2, с. 68—82.
3. Кидин В. В., Смирнов П. М., Иванникова Л. А. Влияние окультуренности почв на трансформацию азота удобрений. — Изв. ТСХА, 1981, вып. 6, с. 62—68.
4. Кидин В. В., Смирнов П. М., Ионов О. Н. Баланс азота удобрений и вымывание азота почвы в лизиметрическом опыте. — В сб.: Вопросы агрохимии азота. — М.: ТСХА, 1982, с. 34—39.
5. Лыков А. М. Органическое вещество и плодородие дерново-подзолистых почв. — Автореф. докт. дис. М., 1977.
6. Сапожников Н. А. Методы прогноза эффективности азотных удобрений. — В кн.: Азот в земледелии Нечерноземной полосы. Л.: Колос, 1977.
7. Смирнов П. М. Вопросы агрохимии азота. М.: ТСХА, 1982.
8. Смирнов П. М., Кидин В. В., Иванникова Л. А. Влияние окультуренности почв на баланс меченого ^{15}N азота удобрений в длительном опыте. — Агрохимия, 1980, № 8, с. 3—12.

Статья поступила 23 января 1985 г.

SUMMARY

A number of microfield and vegetation experiments with the application of nitrogen fertilizers labelled with ^{15}N have shown that the optimal rate of applied nitrogen depends on the level of soil nitrogen supply in the plants. Under low content of available nitrogen

in the soil application of the whole rate of fertilizer nitrogen as dressing resulted in lower yielding capacity of farm crops. On well-cultivated soil utilization coefficient of fertilizer nitrogen was the highest under fertilization during the most intensive consumption of nitrogen by plants.

The structure of the yield varied with the rate of fertilizer nitrogen, which can serve as characteristics for the level of winter wheat supplying with nitrogen.