

УДК 631. 84: 633.14 "324"

Н.Н. ЦЫБУЛЬКА, И.И. ЖУКОВА, Д.В. КИСЕЛЕВА

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ РАСТЕНИЯМИ АЗОТА ПОЧВЫ ПРИ ВНЕСЕНИИ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ

На дерново-подзолистых почвах с применением стабильного изотопа азота ^{15}N изучено влияние доз, сроков и глубины внесения азотных удобрений на величину "экстра-азота". Установлено, что азотные удобрения увеличивают потребление растениями азота почвы по отношению к фосфорно-калийному фону на 15-39%. На единицу внесенного азота удобрений дополнительно мобилизуется 0,12-0,59 единицы почвенного азота. При дробном применении азотных удобрений и с увеличением их доз значение данного показателя снижается.

Установлена тесная положительная корреляция ($r = 0,93$) между полученной от азотных удобрений прибавкой урожая и "экстра-азотом" в растениях.

Введение

Азотные удобрения являются одним из основных источников возмещения дефицита азота в земледелии и повышения продуктивности агрофитоценозов. Исследованиями, проведенными с мечеными тяжелым изотопом ^{15}N азотными удобрениями, выявлены закономерности азотного питания растений и трансформации азота в почве, количественные и качественные параметры, составляющие внутрпочвенный цикл азота. Установлено, что азотные удобрения могут служить одним из основных регуляторов соотношения процессов азотфиксация – денитрификация, иммобилизация – минерализация, в результате которых происходит обогащение или обеднение почвы азотом.

В многочисленных опытах установлено положительное влияние азотных удобрений на потребление почвенного азота растениями. В вариантах с применением азотных удобрений наблюдается большее по отношению к неудобренным вариантам потребление растениями почвенного азота [1–3], который в отечественной литературе получил название "экстра-азот". Западные ученые называют его "затравочный эффект" – priming effect [4, 5] или "добавочный азот взаимодействия" – added nitrogen interaction [6].

Существуют разные теории относительно образования "экстра-азота", однако природа процессов образования в почве и накопления его растениями до конца не раскрыта. Появление "затравочного эффекта" связывают с изменением энергетического статуса почвенных микроорганизмов и включением в растениях ферментативных систем, отвечающих за фиксацию атмосферного азота [7]. Однако "экстра-азот" обнаруживается и в опытах без растений [5].

Теория "ризосферного эффекта" объясняет появление его снижением конкуренции между растениями и ризосферными микроорганизмами за поглощение азота почвы под влиянием азотных удобрений. Высказывались предположения [8] об обмене обогащенного ^{15}N аммония на аммоний почвенного раствора, обменный и фиксированный аммоний почвы, о передаче протона от иона NH_4^+ к аминогруппе, которая, получая протон, способна образовывать NH_3 -радикал и дальше ион NH_4^+ .

В опытах с изолированным питанием, при отсутствии контакта меченого ^{15}N с почвой, было установлено влияние самих растений, их физиологического состояния на высоком уровне азотного питания на дополнительное потребление

ние почвенного азота при внесении азотных удобрений [2]. В настоящее время утвердилась точка зрения об усилении минерализации почвенного азота под действием азотных удобрений [9-12]. По мнению D.S. Jenkinson et. al. [6], “затра- вочный эффект” азотных удобрений может быть реальным, если азот удобрений способствует охвату корневой системы растений большего объема почвы, или кажущимся, если он обусловлен замещением пула минерального азота почвы азотом удобрения или реакцией изотопного обмена. Авторы полагают, что азотные удобрения не усиливают минерализацию почвенного органического вещества, так как после их внесения в почву не повышается выделение CO_2 . И.Н. Шарковым [13] установлено, что азотные удобрения не только не усиливают выделение CO_2 из почвы, но в некоторых случаях даже уменьшают.

На единицу азота удобрений может мобилизоваться дополнительно до 1,2 единицы почвенного азота [14]. Средний размер “экстра-азота” в полевых опытах составляет 36% [15]. С повышением доз азотных удобрений количество его возрастает [16].

Величина “экстра-азота” в растениях часто тесно коррелирует с получаемой от азотных удобрений прибавкой урожая, аккумуляция в профиле почвы нитратов обусловлена дополнительной мобилизацией почвенного азота, а избыток нитратов в урожае объясняется преобладанием азота почвы в составе нитратного фонда растений [17, 18].

Цель настоящей работы – изучить влияние доз, сроков и глубины внесения азотных удобрений на дополнительное потребление растениями почвенного азота и нетто-минерализацию азота дерново-подзолистой почвы.

Объекты и методы исследования. Исследования проводили в микрополевых опытах на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Агрохимическая характеристика почвы (Ап): гумус – 2,19%; общий азот – 0,089%; $\text{pH}_{\text{сод}}$ – 6,05; P_2O_5 – 285 и K_2O – 153 мг/кг почвы. Запас азота в слое почвы 0-40 см: общего – 3,72 т/га; потенциально усвояемого – 156 кг/га; минерального – 89 кг/га. Возделывали озимую рожь. Площадь микроделенок опытов 1 м². Повторность в опытах 4-кратная. Минеральные удобрения применяли из расчета г/м² действующего вещества. Азотные удобрения вносили в виде меченого ¹⁵N раствора аммиачной селитры (¹⁵NH₄¹⁵NO₃) со степенью обогащения изотопом ¹⁵N 20 ат. %.

Схема опыта 1 включала следующие варианты: 1. P_8K_{12} – фон; 2. Фон + N_9 – в ранневесеннюю подкормку; 3. Фон + N_3 – перед посевом + N_6 – в ранневесеннюю подкормку; 4. Фон + N_6 – в ранневесеннюю подкормку + N_3 – в конце фазы кущения – начале выхода в трубку; 5. Фон + N_6 – в ранневесеннюю подкормку + N_3 – в фазу флаг-листа; 6. Фон + N_9 – ранневесеннюю подкормку + N_3 в фазу колошения.

В опыте 2 азотные удобрения вносили на разную глубину в дозе 2 г/м² при возобновлении весенней вегетации растений. Применение небольшого количества носителя метки с высоким обогащением ¹⁵N позволяет более точно изучить процессы трансформации азота в разных слоях почвенного профиля. Схема опыта 2 включала варианты: 1. P_8K_{12} – фон; 2. Фон + N_2 на глубину 0-20 см; 3. Фон + N_2 на глубину 40 см; 4. Фон + N_2 на глубину 60 см.

Анализ растительных образцов на содержание общего азота проводили по Кьельдалю-Иодльбауэру после их мокрого озоления. Изотопный состав азота определяли на масс-спектрометре МИ-2101В.

Результаты и их обсуждение. Азотные удобрения значительно повышали потребление растениями почвенного азота (табл. 1). В результате этого вынос его в вариантах с азотными удобрениями увеличился по сравнению с фосфорно-калийным фоном на 15-39%. Наименьшая величина дополнительно погло-

ценного растениями азота почвы ($1,04 \text{ г/м}^2$ или 15% к фону РК) была отмечена в варианте с осенним внесением части азота (N_3 – до посева + N_6 – в ранневесеннюю подкормку). По-видимому, растения на начальных стадиях онтогенеза при слаборазвитой корневой системе не способны в полной мере поглощать дополнительно минерализованный азот, а с другой стороны, это может быть обусловлено тем, что в осенний период процессы минерализации азотсодержащих органических соединений почвы затухают или прекращаются. Применение дозы 9 г/м^2 азота при возобновлении весенней вегетации посевов, то есть в сроки, приближенные к началу активного потребления растениями элемента и микробиологических процессов в почве, привело к накоплению в растениях “экстра-азота” в количестве $2,41 \text{ г/м}^2$ (35% от общего выноса на фоне РК).

Таблица 1

Влияние доз и сроков внесения азотных удобрений на вынос азота почвы и удобрения и величину “экстра-азота” (опыт 1)

Вариант опыта	Вынос азота, г/м^2			“Экстра-азот”		
	Всего	в том числе		г/м^2	% к фону РК	единиц на единицу $N_{уд}$
		почвы	удобрения			
1. P_8K_{12} – фон	6,96	6,96	-	-	-	-
2. Фон + N_9^I	14,05	9,37	4,68	2,41	35	0,27
3. Фон + N_{3+6}^I	12,13	8,00	4,13	1,04	15	0,12
4. Фон + $N_6^I + N_3^{II}$	14,64	9,09	5,55	2,13	31	0,24
5. Фон + $N_6^I + N_3^{III}$	14,14	8,93	5,21	1,97	28	0,22
6. Фон + $N_6^I + N_3^{IV}$	16,02	9,66	6,36	2,70	39	0,22
НСР _{0,95}	1,90	1,30	0,59	-	-	-

Примечание. Азотные удобрения вносили: N – до посева, N^I – в ранневесеннюю подкормку, N^{II} – в конце фазы кущения – начале выхода в трубку, N^{III} – в фазу раскрытия последнего листа (флаг-листа), N^{IV} – в фазу колошения.

Дробное внесение N_9 в весенне-летний период по сравнению с однократным способствовало меньшему накоплению “добавочного азота” – $1,97$ – $2,13 \text{ г/м}^2$ или 28-31% от общего выноса элемента на фоне РК. По нашему мнению, это обусловлено более интенсивным потреблением растениями внесенного азота, а также меньшим воздействием низких доз удобрений при дробном их применении на минерализацию азотистых соединений почвы. С увеличением дозы азота до 12 г/м^2 абсолютная величина “экстра-азота” возросла до $2,70 \text{ г/м}^2$ (39% к выносу на контроле).

Установлено, что на единицу азота удобрений мобилизуется дополнительно $0,12$ – $0,27$ единицы азота почвы. Наибольшая величина “экстра-азота” в расчете на единицу азота удобрений была отмечена при однократном внесении в ранневесенний период N_9 и составила $0,27$ грамм. Дробное применение той же дозы удобрений снижало значение данного показателя до $0,12$ – $0,24$ грамм. Чем позже проводилась азотная подкормка, тем меньше мобилизовалось азота почвы на единицу внесенного азота. В опытах В.Н. Кудеярова [10] также наибольший минерализующий эффект азотных удобрений проявлялся в начальный период вегетации растений, а затем ослабевал. Автор объясняет это снижением концентрации азота удобрений в почве и расходом минерализованного азота почвы (вынос растениями, иммобилизация, денитрификация). По нашему мнению, усиленный мобилизующий эффект удобрений, вносимых при возобновлении весенней вегетации посевов, обусловлен активизацией микробиологических процессов в почве, а также более интенсивным поглощением растениями азота на

ранних стадиях онтогенеза. С увеличением доз азотных удобрений от 9 до 12 г/м² абсолютная величина "экстра-азота" хотя и возрастала, но количество его в расчете на единицу внесенного азота не повышалось.

В опыте 2 величина "экстра-азота" снижалась от 1,18 г/м² при внесении удобрений в слой 0-20 см до 0,28 и 0,06 г/м² при размещении их соответственно на глубину 40 и 60 см (табл. 2). Так же уменьшалось и количество его в расчете на единицу внесенного азота.

Таблица 2

Влияние глубины внесения азотных удобрений на вынос азота почвы и удобрения и величину "экстра-азота" (опыт 2)

Вариант опыта	Вынос азота, г/м ²			"Экстра-азот"		
	Всего	в том числе		г/м ²	% к фону РК	единиц на единицу N _{уд}
		почвы	удобрения			
1. P ₈ K ₁₂ (фон)	6,96	6,96	-	-	-	-
2. Фон +N ₂ ' (A _п)	9,46	8,14	1,32	1,18	17	0,59
3. Фон +N ₂ ' (40 см)	8,57	7,24	1,33	0,28	4	0,14
4. Фон +N ₂ ' (60 см)	7,92	7,02	0,90	0,06	1	0,03
НСР _{0,95}	0,30	0,18	0,10	-	-	-

Корреляционно-регрессионный анализ экспериментальных данных показал, что между величиной "экстра-азота" в растениях и продуктивностью культуры существует очень тесная связь ($r = 0,92$), описываемая уравнением $y = 447,4 + 102,0x$.

Для разработки научно обоснованных приемов внесения азотных удобрений важно знать количество минерализуемого за вегетационный период (нетто-минерализация) почвенного азота, который может участвовать в формировании урожая, но многообразие процессов превращения элемента в почве не позволяет определить его прямыми способами. В последние годы для этого используют косвенный метод – расчет величины A , основанный на принципе Фрида и Дина [19], который заключается в допущении, что поведение в почве и степень использования растениями азота удобрений и азота почвы аналогичны. М. Фрид и Л. Дин, позже Ф.Е. Турчин [7] предложили рассчитывать величину A в вариантах с мечеными азотными удобрениями по формулам 1-3, а для контрольного варианта – методом экстраполяции, основанном на принципе Херлихи и Шихана [20], математическое выражение которого отражает формула 4.

$$A_{NPK} = D (1-y)/y, \quad (1)$$

$$A_{NPK} = D K_y / K_p - 1, \quad (2)$$

$$A_{NPK} = (D/N_y) N_{п'}, \quad (3)$$

$$A_{PK} = {}^{14}N_B PK D/N_B, \quad (4)$$

где D – доза азотного удобрения, y – доля азота удобрений в общем выносе элемента растениями, K_y и K_p – избыток ат. % ¹⁵N в удобрении и урожае растений соответственно, $N_{п'}$ и N_y – вынос растениями азота удобрений и азота почвы, ${}^{14}N_B PK$ – вынос азота в варианте PK, N_B – прибавка выноса азота от минимальной дозы азотного удобрения по отношению к контролю.

Из вычисленных по ¹⁵N величин A видно, что они изменяются в зависимости от доз и сроков внесения азотных удобрений (табл. 3). На фосфорно-калийном фоне величина нетто-минерализации составляла 11,8 г/м². При повышении доз ранневесенних азотных подкормок от 2 до 9 г/м² она возросла с 12,3 до 18,0 г/м², а для диапазона доз N₉-N₁₂ оставалась на одном и том же уровне – 18,0-18,2 г/м².

Таблица 3

Нетто-минерализация азота почвы (величина А) в зависимости от доз и сроков применения азотных удобрений (опыт 1)

Вариант опыта	Урожайность зерна, г/м ²	Прибавка, г/м ²	Величина А		КИУ N _{уд.} , %	Вынос N _{п.} , % от минерализуемого
			г/м ²	кг/га		
1. P ₈ K ₁₂ – фон	414,7	-	11,8	118	-	59
2. Фон + N ₉ ^I	648,2	233,5	18,0	180	52	52
3. Фон + N ₃₊₆ ^I	626,9	212,2	17,4	174	46	46
4. Фон + N ₆₊₃ ^{II}	697,2	282,5	14,7	147	62	62
5. Фон + N ₆₊₃ ^{III}	658,9	244,2	15,4	154	57	58
6. Фон + N ₆₊₃ ^{IV}	715,6	300,9	18,2	182	53	53
HCP _{0,95}	25,0	-	-	-	-	-

Дробное применение азотных удобрений в весенне-летний период вегетации растений по отношению к однократному внесению той же дозы в ранневесеннюю подкормку снижало величину А на 2,6-3,3 г/м² (14-18%).

В зависимости от глубины внесения удобрений не проявлялось четкой закономерности в изменении анализируемого показателя (табл. 4). Величина А тесно коррелировала с количеством "экстра-азота" в растениях ($r = 0,72$), с одной стороны, а продуктивность озимой ржи с величиной А ($r = 0,78$) – с другой.

Таблица 4

Нетто-минерализация азота почвы (величина А) при равной глубине внесения азотных удобрений

Вариант опыта	Урожайность зерна г/м ²	Прибавка, г/м ²	Величина А		КИУ N _{уд.} , %	Вынос N _{п.} , % от минерализуемого
			г/м ²	кг/га		
1. P ₈ K ₁₂ (фон)	414,7	-	11,8	118	-	59
2. Фон + N ₂ ^I (A _п)	538,6	123,9	12,3	123	66	66
3. Фон + N ₂ ^I (40 см)	510,7	96,0	10,9	109	67	66
4. Фон + N ₂ ^I (60 см)	484,1	69,4	15,6	156	45	45
HCP _{0,95}	26,3	-	-	-	-	-

Показатели использования растениями азота почвы в процентах от величины нетто-минерализации, которые по существу являются коэффициентами использования усвояемого азота почвы, аналогичны коэффициентам использования растениями азота удобрений.

Заключение

Азотные удобрения повышают потребление растениями азота почвы по отношению к фосфорно-калийному фону на 15-39%. При дробном внесении N₉ по сравнению с однократным, количество "экстра-азота" в растениях снижается на 0,18-1,37 г/м², а при увеличении дозы удобрения до N₁₂ возрастает на 0,29-0,73 г/м². С увеличением глубины внесения азотных удобрений размеры "добавочного" азота в растениях уменьшаются. На единицу азота удобрений дополнительно мобилизуется 0,12-0,59 единицы азота почвы. При дробном внесении азотных удобрений и с увеличением их доз значение данного показателя снижается.

Наличие тесной положительной корреляции ($r = 0,93$) между полученной от азотных удобрений прибавкой урожая и "экстра-азотом" в растениях указывает

на то, что величину дополнительного потребления азота почвы под влиянием азотного удобрения необходимо учитывать при оптимизации азотного питания сельскохозяйственных культур.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Турчин, Ф.В.** Превращение азотных удобрений в почве и усвоение их растениями / Ф.В. Турчин // *Агрохимия*. – 1964. – № 3. – С. 3-19.
2. **Сирота, Л.Б.** Влияние азотных удобрений на использование растениями азота почвы / Л.Б. Сирота // *Азот в земледелии нечерноземной полосы*. – Л., 1973. – С. 143-181.
3. **Кореньков, Д.А.** Агрохимия азотных удобрений / Д.А. Кореньков. – М.: Наука, 1976. – 223 с.
4. **Stewart, B.A.** The availability of fertilizer nitrogen immobilized during the decomposition of straw / B.A. Stewart, O.D. Johnson, L.K. Porter // *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* – 1963. – Vol. 27. – N 4. – P. 656-659.
5. **Broadbent, F.E.** Effect of fertilizer nitrogen on the release of soil nitrogen / F.E. Broadbent // *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* – 1965. – Vol. 29. – N 5. – P. 692-695.
6. **Jenkinson, D.S.** Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen the so-called "priming" effect / D.S. Jenkinson, R.H. Fox, J.H. Rayner // *J. Soil Sci.* – 1985. – Vol. 36. – N 3. – P. 425-444.
7. **Турчин, Ф.В.** Использование азотных удобрений урожаем и их превращение в почве / Ф.В. Турчин // *Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева*. – 1965. – Т. 10. – № 4. – С. 400-407.
8. **Laura R.D.** // *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 195. – Vol. 39. – N 2. – P. 385-386.
9. **Гамзиков, Г.П.** Азот в земледелии Западной Сибири / Г.П. Гамзиков. – М.: Наука, 1981. – 268 с.
10. **Кудеяров, В.Н.** Цикл азота в почве и эффективность удобрений / В.Н. Кудеяров. – М.: Наука, 1989. – 216 с.
11. Количественная оценка процессов азотного цикла при внесении возрастающих доз азотных удобрений / В.Н. Кудеяров [и др.] // *Агрохимия*. – 1992. – № 2. – С. 3-13.
12. **Руделев, Е.В.** Дополнительная минерализация азота почвы при внесении азотных удобрений / Е.В. Руделев // *Почвоведение*. – 1989. – № 12. – С. 84-91.
13. **Шарков, И.Н.** Азотные удобрения и минерализация азотсодержащих соединений почв / И.Н. Шарков // *Почвоведение*. – 1992. – № 2. – С. 91-103.
14. **Кудеяров, В.Н.** Изменение внутрипочвенных потоков азота при внесении азотных удобрений / В.Н. Кудеяров, С.А. Благодатский, Н.А. Ларионова // *Агрохимия*. – 1990. – № 1. – С. 47-53.
15. **Смирнов, П.М.** Вопросы агрохимии азота / П.М. Смирнов. – М.: ТСХА, 1982. – 72 с.
16. **Гамзиков, Г.П.** Баланс и превращение азота удобрений / Г.П. Гамзиков, Г.И. Кострик, В.Н. Емельянова. – Новосибирск: Наука, 1985. – 161 с.
17. **Помазкина, Л.В.** Агрохимия азота в таежной зоне Прибайкалья / Л.В. Помазкина. – Новосибирск: – Наука, 1985. – 176 с.
18. **Соколов, О.А.** Нитраты в окружающей среде / О.А. Соколов, В.М. Семенов, В.А. Агаев. – Пушино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1990. – 316 с.
19. **Fried, M.** A concept concerning the measurement of available soil nutrients / M. Fried, L. Dean // *Soil Science*. – 1952. – Vol. 73. – N4. – P. 263-271.
20. **Herlihy M.** Nitrogen mineralization in soil of varying texture, moisture and organic matter / M. Herlihy, P. Sheehan // *Plant and Soil* – 1979. – Vol. 53. – P. 269-275.

Поступила в редакцию 20.12.2006 г.