

ПОТОКИ ^{15}N , ПОЧВЕННОГО И СИМБИОТИЧЕСКОГО АЗОТА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЭРОДИРОВАННОЙ ПОЧВЕ

© 2020 г. А. А. Завалин^{1,*}, Н. Я. Шмырева¹, О. А. Соколов¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

*E-mail: zavalin.52@mail.ru

Поступила в редакцию 20.01.2020 г.

После доработки 04.02.2020 г.

Принята к публикации 10.03.2020 г.

В микрополевым опыте с использованием меченого ^{15}N азотного удобрения на эродированной дерново-подзолистой среднесуглинистой почве в течение 15 лет при выращивании в севообороте зерновых культур и многолетних бобово-злаковых трав 2-го и 3-го года жизни изучали потоки азота в системе удобрения–почва–растения. Возделываемые культуры в 1.3–1.5 раза больше потребляли азот удобрения (^{15}N), почвенный и симбиотический азот на приводораздельной части склона по сравнению с нижней его частью. В почве приводораздельной части склона иммобилизовалось в 1.3–1.4 раза больше и в 1.3–3.0 раза меньше терялось ^{15}N , чем в нижней части склона. При локальном способе применения азотного удобрения культуры севооборота потребляли в 1.3–1.6 раза больше ^{15}N , в 1.2 раза – азота почвы и в 1.3–1.6 раза – симбиотического азота по сравнению с разбросным способом внесения. При локализации азотного удобрения иммобилизация азота удобрения и симбиотического и минерализация почвенного азота под культурами севооборота увеличивалась в 1.1–1.5 раза на всех элементах склона, газообразные потери азота, наоборот, снижались в 1.4–7.2 раза. При локальном внесении азотного удобрения биомасса зерна повышалась на 26–28%, сена трав – на 19–26%, содержание сырого белка увеличивалось на 0.3–1.1% в зерне на 3.4–5.4% – в сене многолетних трав. Агрофитоценоз многолетних бобово-злаковых трав функционировал в более устойчивом состоянии по сравнению с зерновыми культурами, это достигалось за счет дополнительного использования биологического азота, большей его иммобилизации и меньших потерь элемента. При разбросном способе внесения ^{15}N мигрировал вниз по склону от места его внесения на расстоянии 5 м в первый год, 9 м – на 3-й год и 55 м – через 15 лет на приводораздельной части склона (2–3°) и на 8 м, 13 м и 72 м соответственно в нижней части склона (5–7°).

Ключевые слова: азотное удобрение, изотоп ^{15}N , потоки азота, иммобилизация, минерализация, устойчивость агроценоза, эродированная почва.

DOI: 10.31857/S0002188120060149

ВВЕДЕНИЕ

Азот является важнейшим фактором регулирования минерального питания растений и плодородия почв, в том числе подверженным водной эрозии. Эрозия почв – серьезная проблема современного земледелия, которая наносит ущерб их плодородию и продуктивности сельскохозяйственных культур, усиливает экологическую нестабильность агроценозов [1]. С жидким стоком в результате эрозии почв из почв теряется ≈ 1.4 млн т азота в год. Водная эрозия сопровождается процессами дегумификации почв, не использованный растениями азот удобрений претерпевает в почве целый ряд превращений: иммобилизуется почвой, улетучивается в атмосферу и вымывается в нижние горизонты почвенного профиля, а на

склонах, кроме этого, мигрирует с поверхностным и внутрпочвенным латеральным стоком талых и ливневых вод [2]. Все это приводит к увеличению отрицательной статьи баланса азота при недостаточном внесении минеральных и других удобрений [3]. Оценить потоки азота в агросистеме возможно с применением стабильного изотопа азота ^{15}N [4]. Ранее было показано, что при внесении изотопно-меченого Na в дерново-подзолистой почве иммобилизовалось 24–40% азота удобрения (от применяемой дозы). Степень использования зерновыми культурами иммобилизованного азота снижалась в первые 5 лет, а затем оставалась на одном уровне – $\approx 1\%$ от исходного содержания. За 14 лет систематического внесения меченого азота удобрений растения использова-

ли из суглинистой почвы 31%, из супесчаной – 18% от внесенного количества ^{15}N [4, 5]. Установлено также, что использование азота растениями и его закрепление в почве определяются соотношением $\text{C} : \text{N}$ в поступающих растительных остатках. В частности, при внесении растительных остатков с широким соотношением $\text{C} : \text{N}$ (например, солома риса) в почве закреплялось максимальное количество меченого азота по сравнению с растительными остатками с узким соотношением углерода и азота (соя, сорго) [6]. Эти данные характеризуют отдельные аспекты участия азота удобрения в круговороте этого элемента в системе почва–растения и не раскрывают потоки элемента при использовании других его источников.

Цель работы – определить параметры круговорота азота удобрения, почвенного и симбиотического азота в агрофитоценозе сельскохозяйственных культур при длительном внесении меченого ^{15}N азотного удобрения (N_a) в севообороте на эродированной дерново-подзолистой почве.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в течение 15 лет (2000–2015 гг.) с сернокислым аммонием (N_a), обогащенным меченым азотом ^{15}N (20 ат. %) в микрополевом опыте, который размещали на делянках длительного стационарного опыта Смоленского НИИСХ в севообороте с чередованием культур: озимая рожь – овес – ячмень с подсевом многолетних трав – травы 2-го года жизни – травы 3-го года жизни. Почва – дерново-подзолистая среднесуглинистая на карбонатном моренном суглинке слабо- (приводораздельная часть склона 2–3°) и среднесмытая (нижняя часть склона 5–7°). Содержание физической глины – 32–34%. Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы верхней и нижней части склона: pH_{KCl} 5.7 и 6.1, H_r (по Каппену) – 1.8 и 0.8 ммоль-экв/100 г почвы, содержание обменных Ca^{2+} – 5.5 и 6.0 и Mg^{2+} – 2.0 и 2.2 ммоль-экв/100 г почвы, гумус (по Тюрину) – 2.1 и 0.8%, $\text{N}_{\text{общ}}$ – 0.19 и 0.9%, подвижный P_2O_5 – 137 и 187 мг/кг и подвижный K_2O – 138 и 167 мг/кг почвы (по Кирсанову). Микрополевым опытом (размер делянок 0.5 × 1 м) проводили на склоне ЮВ (юго-восточной) экспозиции вогнуто-выпуклой формы в верхней части с уклоном 2–3°, в нижней – 5–7°. Повторность опыта четырехкратная, с ^{15}N – двукратная. Защитные полосы между микроделянками составляли 0.5 м. Обработка почвы: отвальная вспашка + рыхление подпахотного слоя на глубину 10–15 см. Перед за-

кладкой опыта проведено известкование почвы из расчета полной нормы гидролитической кислотности. Меченое азотное удобрение (N50 для зерновых и N30 для трав) вносили весной лентой на глубину 10 см и вразброс на фоне РК-удобрений ($\text{P}_{\text{сд}}$ в дозах P50 для зерновых и P30 для трав и K_x в дозах K50 для зерновых и K30 для трав).

В почвенных и растительных образцах определяли: $\text{N}_{\text{общ}}$ – методом сухого сжигания по Дюма на анализаторе Flesh EA модель 1112, атомный % ^{15}N – на масс-спектрометре “Delta V” (ФРГ). Потоки азота в агроэкосистеме рассчитывали по методикам [7–10]. Результаты учета биомассы статистически обрабатывали методом дисперсионного анализа (STATVNIА), достоверность различий оценивали по F -критерию Фишера.

Метеоусловия в период вегетации культур севооборота несколько различались, например, гидротермический коэффициент (при средне-многолетней норме 1.7) изменялся в течение севооборота при выращивании озимой ржи – 1.3–1.7, овса – 0.9–1.5, ячменя – 1.6–2.0, трав 2-го года жизни – 1.5–2.1, трав 3-го года жизни – 1.0–2.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате 15-летнего исследования установлено, что максимальное количество азота удобрения (в 1.4–1.5 раза больше) и азот почвы (в 1.5 раза больше) зерновые культуры потребляли на приводораздельной части склона по сравнению с нижней его частью (табл. 1). При локальном применении N_a зерновые культуры в 1.3–1.4 раза больше потребляли азот удобрения и в 1.2 раза больше – азот почвы по сравнению с разбросным способом его внесения. Локализация азотного удобрения обеспечивала дополнительное потребление зерновыми культурами “экстра-азота”: в 1.3–1.4 раза больше на приводораздельной части склона и в 1.2–1.6 раза – в нижней его части.

Потребление многолетними травами 2-го года жизни азота удобрения, азота почвы и симбиотического азота в нижней части склона снижалось в 1.5–1.6 раза, травами 3-го года жизни – в 1.3–1.5 раза по сравнению с приводораздельной его частью (табл. 2). В травах 3-го года жизни вследствие выпадения клевера при перезимовке [10] повышалась доля азота удобрения и азота почвы и снижалась доля симбиотического азота.

При локальном применении азотного удобрения многолетние травы 2-го года жизни в 1.8 раза больше потребляли азот удобрения, азота почвы – в 1.2 раза и симбиотического азота – в 1.3 раза, тогда как травы 3-го года жизни – в 1.5, 1.2 и 1.4 раза

Таблица 1. Потребление азота удобрения и азота почвы зерновыми культурами

Вариант	Общий вынос азота, г/м ²	В том числе азот				“Экстра-азот”	
		удобрения		почвы			
		1	2	1	2	1	2
Приводораздельная часть склона, 2–3°							
P50K50 (фон)	3.24	–	–	3.24	100	–	–
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	6.33	1.07	18	5.78	82	2.01	30
Фон + ¹⁵ N50 локально	9.01	1.82	21	6.94	79	4.14	42
Нижняя часть склона, 5–7°							
P50K50 (фон)	2.12	–	–	2.12	100	–	–
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	4.58	0.68	18	3.90	82	1.56	34
Фон + ¹⁵ N50 локально	5.96	1.22	23	4.74	77	2.58	41
<i>P</i> , %	4						
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	0.84						
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	0.60						
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	0.49						

Примечание. В графе 1 – г/м², 2 – %. То же в табл. 2, 9.

соответственно по сравнению с разбросным способом внесения N_a .

В нижней части склона зерновые культуры использовали в 1.5 раза, а бобово-злаковые травы – в 1.3–1.5 раза меньше азот удобрения по сравнению с приводораздельной частью (табл. 3). При этом иммобилизация азота удобрения снижалась при выращивании зерновых культур в 1.4–1.5 раза, а при выращивании трав – в 1.1–1.2 раза. Газообразные потери азота удобрения, наоборот, возрастали при выращивании зерновых культур в 1.3–1.8 раза, при выращивании бобово-злаковых трав – в 1.3–3.0 раза. Наиболее интенсивно газообразные соединения азота возрастали при выращивании многолетних трав 3-го года жизни (в 1.5–3.0 раза). Повышение потерь азота удобрения в нижней части склона связано с температурно-влажностным режимом почвы, с изменением структуры микробоценоза, усилением процессов денитрификации [2], в результате этого снижалось участие азота удобрения в продукционном процессе.

При локальном применении азотного удобрения зерновые культуры в 1.5–1.6 раза лучше использовали азот удобрения, травы 2-го года жизни – в 1.9–2.0 раза, травы 3-го года жизни – в 1.4–1.6 раза по сравнению с разбросным способом его внесения. Азотное удобрение, внесенное локально, стимулировало минерализацию и иммобилизацию азота в почве одновременно (с разной скоростью), вследствие чего происходило сужение

соотношения C : N в почве [2, 11]. В результате растения лучше использовали азот удобрения и азот почвы (а травы – и симбиотический азот), его больше иммобилизовалось в почве и меньше терялось, не загрязняя окружающую среду [12, 13].

На дерново-подзолистых почвах зерновые культуры формируют азотный пул за счет почвенного азота (63–90% от общего выноса), а бобовые растения – за счет симбиотического азота (40–85% от общего выноса) [2, 14]. Потоки азота при выращивании зерновых культур характеризовались следующими параметрами (табл. 4). Например, при выращивании ячменя доля нетто-минерализации азота росла от приводораздельной части к основанию склона (72–83 против 66–73% в верхней части склона). Реиммобилизация почвенного азота проходила с наименьшей скоростью при разбросном применении азотного удобрения в нижней части склона.

Складывающиеся условия минерализации почвенного азота существенно влияли на образование и потери газообразных азотсодержащих соединений. В нижней части склона терялось больше в 1.4–1.5 раза почвенного азота, чем на приводораздельной его части. При локальном применении N_a газообразные потери азота почвы снижались в 2 раза на всех элементах склона. При разбросном применении N_a усиливались процессы минерализации почвенного азота, росло образование газообразных азотсодержащих соединений и сни-

Таблица 2. Потребление азота удобрения, азота почвы и симбиотического азота многолетними бобово-злаковыми травами

Вариант	Общий вынос азота, г/м ²	В том числе азот				Симбиотический азот	
		удобрения		почвы			
		1	2	1	2	1	2
Травы 2-го года жизни							
Приводораздельная часть склона, 2–3°							
Р30К30 (фон)	9.5	–	–	1.5	17	8.0	83
Фон + ¹⁵ N30 вразброс	12.2	0.7	6	2.0	18	9.8	77
Фон + ¹⁵ N30 локально	16.4	1.4	8	2.3	15	12.7	77
Нижняя часть склона, 5–7°							
Р30К30 (фон)	6.1	–	–	1.0	17	5.1	83
Фон + ¹⁵ N30 вразброс	7.1	0.5	7	1.2	18	6.2	75
Фон + ¹⁵ N30 локально	10.6	1.0	9	1.5	15	8.1	76
<i>P</i> , %	3						
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	4.4						
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	3.1						
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	2.5						
Травы 3-го года жизни							
Приводораздельная часть склона, 2–3°							
Р30К30 (фон)	4.1	–	–	2.4	58	1.7	42
Фон + ¹⁵ N30 вразброс	8.6	1.0	11	4.2	49	3.4	40
Фон + ¹⁵ N30 локально	11.0	1.5	14	4.9	44	5.2	38
Нижняя часть склона, 5–7°							
Р30К30 (фон)	2.9	–	–	1.8	51	1.4	49
Фон + ¹⁵ N30 вразброс	5.6	0.7	13	2.6	48	2.3	40
Фон + ¹⁵ N30 локально	7.0	1.1	15	2.9	41	3.1	44
<i>P</i> , %	4						
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	4.2						
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	3.0						
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	2.4						

жалось его участие в продукционном процессе зерновых культур.

При выращивании многолетних бобово-злаковых трав 3-го года жизни растения больше потребляли азот почвы и меньше симбиотический азот по сравнению с травами 2-го года жизни (табл. 5). Под травами 3-го года жизни усиливались процессы минерализации, иммобилизации и образование газообразных соединений почвенного азота. В верхней части склона больше минерализовалось и закреплялось почвенного азота и меньше его терялось по сравнению с нижней его частью.

Под травами 3-го года жизни существенно снижалась интенсивность процессов минерализации–иммобилизации/реиммобилизации симбиотического азота. Снижалось также образование газообразных соединений по сравнению с травами 2-го года жизни. Активность этих процессов превращения симбиотического азота снижалась в нижней части склона в 1.1–1.3 раза по сравнению с верхней приводораздельной его частью. При локальном применении азотного удобрения активность процессов минерализации и иммобилизации симбиотического азота снижалась по сравнению с разбросным способом его

Таблица 3. Потоки и баланс азота удобрения при выращивании зерновых культур и многолетних бобово-злаковых трав на различных элементах рельефа

Вариант	Использовано растениями		Иммобилизовано в слое 0–100 см почвы		Потери	
	1	2	1	2	1	2
Зерновые культуры						
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	<u>1.09</u> 21	<u>0.68</u> 14	<u>1.35</u> 27	<u>0.92</u> 18	<u>2.56</u> 52	<u>3.40</u> 68
Фон + ¹⁵ N50 локально	<u>1.82</u> 33	<u>1.22</u> 24	<u>1.87</u> 37	<u>1.34</u> 27	<u>1.31</u> 26	<u>2.45</u> 49
<i>P</i> , %	3		4		3	
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	0.13		0.22		0.30	
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	0.10		0.16		0.21	
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	0.10		0.16		0.21	
Травы 2-го года жизни						
Фон + ¹⁵ N30 вразброс	<u>0.69</u> 23	<u>0.53</u> 17	<u>1.06</u> 35	<u>0.86</u> 29	<u>1.25</u> 42	<u>1.61</u> 54
Фон + ¹⁵ N30 локально	<u>1.36</u> 45	<u>1.00</u> 34	<u>1.25</u> 42	<u>1.06</u> 35	<u>0.40</u> 13	<u>0.94</u> 31
<i>P</i> , %	4		4		4	
<i>HCP</i> ₀₅ частных средних, г/м ²	0.14		0.15		0.25	
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	0.10		0.11		0.17	
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	0.10		0.11		0.17	
Травы 3-го года жизни						
Фон + ¹⁵ N30 вразброс	<u>0.96</u> 32	<u>0.73</u> 24	<u>1.20</u> 41	<u>0.97</u> 33	<u>0.84</u> 30	<u>1.30</u> 44
Фон + ¹⁵ N30 локально	<u>1.53</u> 51	<u>1.08</u> 36	<u>1.22</u> 40	<u>1.12</u> 37	<u>0.25</u> 9	<u>0.80</u> 27
<i>P</i> , %	4		3		4	
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	0.62		0.23		0.41	
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	0.44		0.16		0.29	
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	0.44		0.16		0.29	

Примечание: В графе 1 – приводораздельная часть склона, 2–3°; 2 – нижняя часть склона 5–7°; над чертой – азот удобрения, г/м²; под чертой – азот удобрения, % от внесенного.

внесения. Низкое использование азота удобрения озимой рожью (9–16% от примененной дозы) при разбросном способе применения удобрения связано с высокой его миграцией с поверхностным стоком и по профилю почвы, а также со значительными газообразными потерями (61–75% от дозы) [12].

Агрофитоценоз многолетних бобово-злаковых трав функционировал в более устойчивом состоянии по сравнению с зерновыми культурами (табл. 6). Агрофитоценоз злаковых культур нахо-

дился в зоне резистентности (на более низком уровне устойчивости). Более высокая устойчивость агрофитоценоза трав достигалась за счет дополнительного (лучшего) использования биологического азота, большей его иммобилизации и меньших потерь азота [14–17]. Одновременно бобово-злаковые травы 3-го года жизни уступали травам 2-го года жизни на всех элементах склона при обоих способах применения азотного удобрения. Устойчивость трав 3-го года жизни не изменилась при локальном способе внесения азотного

Таблица 4. Потоки азота почвы при выращивании ячменя на различных элементах рельефа, г/м²

Показатель	Приводораздельная часть склона, 2–3°		Нижняя часть склона, 5–7°	
	1	2	1	2
Потребление азота почвы растениями	6.6	11.4	4.7	6.9
Остаточный минеральный азот	1.8	3.1	0.7	1.0
Иммобилизованный–реиммобилизованный азот почвы	13.2	13.0	8.5	9.7
Газообразные потери азота почвы	25.6	12.3	34.1	17.9
Минерализованный азот почвы	52.3	44.1	53.1	40.5
Нетто-минерализованный азот	37.7	29.4	43.6	29.5
Реиммобилизованный азот	14.6	14.8	9.4	11.1
<i>P</i> , %	2			
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	0.5			
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	0.9			
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	0.9			

Примечание: В графе 1 – азот удобрения вразброс, 2 – азот удобрения локально. То же в табл. 5.

удобрения по сравнению с разбросным способом его применения, поскольку минерализация и иммобилизация почвенного азота изменялась с одинаковой скоростью [7].

Продуктивность зерновых культур в зернотравяном севообороте определялась местом их размещения на склоне и применением N_a (табл. 7). Наибольшую массу зерна (по результатам 3-х ротаций севооборота) формировал ячмень. Все зерновые культуры на приводораздельной части склона формировали массу зерна и соломы больше в 1.4–1.5 раза по сравнению с нижней частью склона. При локальном внесении N_a масса зерна всех культур повышалась на 26–28, масса соломы – на 63–64% по сравнению с разбросным способом его применения.

Содержание в урожае сырого белка определяется биологическими особенностями культур и условиями их выращивания (табл. 8). В нижней части склона содержание сырого белка в зерне изученных культур снижалось в среднем на 0.5–1.0% (озимой ржи – на 0.4–1.0%, овса – на 0.1–0.7%, ячменя – на 1.0–1.4%) по сравнению с приводораздельной частью склона, что было связано с условиями азотного питания и потоками азота в агроэкосистеме [2, 4, 7]. При локальном применении N_a содержание сырого белка в зерне повышалось в среднем на 0.7–1.0% (озимой ржи – на 0.8–0.9%, овса – на 0.7–1.3%, ячменя – на 0.7–0.9%) по сравнению с разбросным способом внесения.

За счет лучшего потребления азота удобрения, почвенного и симбиотического азота многолетние бобово-злаковые травы 2-го и 3-го года жизни формировали в 1.4 раза большую массу сена на приводораздельной части склона по сравнению с нижней его частью (табл. 9). За счет локализации азотного удобрения продуктивность травосмесей повышалась: трав 2-го года жизни – на 19–20, трав 3-го года жизни – на 21–26% по сравнению с разбросным способом его внесения.

Минимальное содержание сырого белка многолетние бобово-злаковые травы накапливали на приводораздельной части склона при локальном применении азотного удобрения. Например, в верхней части склона содержание сырого белка в биомассе трав 2-го года жизни превышало на 1.2–2.9%, в травах 3-го года жизни на 3.0–4.0% по сравнению с травами нижней части склона. При локальном применении азотного удобрения содержание сырого белка повышалось в биомассе трав 2-го года жизни на 3.9–5.4%, трав 3-го года жизни – на 3.4–3.5% по сравнению с разбросным способом его внесения в дозе N_{30} .

Установлена также миграция ^{15}N по склону почвы при разбросном систематическом 15-летнем применении азотного удобрения в 5-польном зерно-травяном севообороте в результате водной эрозии. Показано, что азот удобрения мигрировал вниз по склону от места его внесения на расстояние 5 м в первый год, 9 м – на 3-й год и 55 м – через 15 лет на приводораздельной части

Таблица 5. Потоки азота почвы и симбиотического азота при выращивании многолетних бобово-злаковых трав на склоне

Показатель	Верхняя часть склона, 2–3°		Нижняя часть склона, 5–7°	
	1	2	1	2
Травы 2-го года жизни				
Азот почвы				
Общий вынос азота почвы	1.7	1.9	1.4	1.7
Иммобилизованный азот	3.9	2.4	3.1	3.1
Газообразные потери азота почвы	3.8	0.6	6.2	2.8
Минерализованный азот (М)	9.7	5.3	10.8	7.9
Нетто-минерализованный азот (Н-М)	5.8	2.9	7.7	4.8
Реиммобилизованный азот (РИ)	3.6	2.1	3.0	2.9
<i>P</i> , %	3			
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	0.4			
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	0.3			
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	0.1			
Симбиотический азот				
Вынос симбиотического азота	12.6	14.9	8.2	9.9
Остаточный минеральный азот	0.8	1.0	0.3	0.5
Иммобилизованный азот	20.1	14.0	15.5	11.7
Газообразные потери азота	19.7	2.8	26.9	11.5
Минерализованный азот (М)	53.1	32.7	51.9	33.5
Нетто-минерализованный азот (Н-М)	33.0	18.7	35.4	21.8
Реиммобилизованный азот (РИ)	19.3	13.1	16.3	11.2
<i>P</i> , %	3			
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	1.3			
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	0.9			
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	0.9			
Травы 3-го года жизни				
Азот почвы				
Общий вынос азота почвы	3.3	4.1	2.1	2.3
Иммобилизованный азот	5.5	5.4	5.0	3.5
Газообразные потери азота почвы	4.3	1.0	7.2	3.5
Минерализованный азот (М)	13.4	10.8	14.4	9.5
Нетто-минерализованный азот (Н-М)	7.9	5.4	9.3	6.0
Реиммобилизованный азот (РИ)	5.3	5.1	4.9	3.3
<i>P</i> , %	3			
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	0.5			
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	0.4			
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	0.2			

Таблица 5. Окончание

Показатель	Верхняя часть склона, 2–3°		Нижняя часть склона, 5–7°	
	1	2	1	2
Симбиотический азот				
Вынос симбиотического азота	3.4	3.6	1.4	2.2
Остаточный минеральный азот	0.7	1.0	0.3	0.4
Иммобилизованный азот	5.6	3.4	2.7	2.7
Газообразные потери азота	4.4	0.6	3.8	2.3
Минерализованный азот (М)	14.6	8.7	8.2	7.6
Нетто-минерализованный азот (Н-М)	9.0	5.2	5.5	4.9
Реиммобилизованный азот (РИ)	4.9	2.5	2.4	2.3
<i>P</i> , %	4			
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	0.5			
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	0.4			
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	0.2			

склона (2–3°) и на 8, 13 и 72 м соответственно в нижней части склона (5–7°).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования, проведенного в 3-х ротациях 5-польного зернотравяного севооборота (2000–2015 гг.), на склоне юго-восточный экспозиции эродированной дерново-подзолистой почвы определены параметры круговорота азота удобрения, почвенного и симбиотического азота. В приводораздельной части склона (2–3°) зерновые культуры и многолетние бобово-злаковые

травы больше в 1.3–1.5 раза потребляли азот удобрения и почвенный азот, травы также лучше потребляли симбиотический азот по сравнению с нижней частью склона (5–7°). При выращивании многолетних бобово-злаковых трав (2-го и 3-го годов жизни) в почве закреплялось азота на 22% больше, чем после зерновых культур (30–41% и 18–38% от дозы соответственно). В почве приводораздельной части склона иммобилизовалось азота удобрения больше в 1.3 раза, почвенного и симбиотического азота – в 1.4 раза, чем в нижней части склона.

Таблица 6. Показатели интегральной оценки функционирования системы почва–растение при выращивании зерновых культур и многолетних бобово-злаковых трав

Часть склона	Способ внесения азотных удобрений	Зерновые культуры		Многолетние травы 2-го года жизни		Многолетние травы 3-го года жизни	
		1	2	1	2	1	2
Приводораздельная часть склона, 2–3°	Н взброс	28	2.6	37	1.7	38	1.6
	Н локально	34	2.0	40	1.4	37	1.8
Нижняя часть склона, 5–7°	Н взброс	18	4.6	31	2.2	32	2.0
	Н локально	27	2.6	34	1.9	32	2.0
<i>P</i> , %	4		4	3	4	3	4
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	5		0.4	4	0.3	4	0.4
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	4		0.3	2	0.2	2	0.3
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	4		0.3	2	0.2	2	0.3

Примечания. 1. Минерализованный азот – М, нетто-минерализованный азот – Н-М, реиммобилизованный азот – РИ. 2. В графе 1 – РИ : М, %; 2 – Н-М : РИ.

Таблица 7. Продуктивность зерновых культур при выращивании на различных элементах склона

Вариант	Зерно	Прибавка		Солома	Прибавка	
	г/м ²	%		г/м ²	%	
Приводораздельная часть склона, 2–3°						
P50K50 (фон)	177	–	–	269	–	–
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	301	123	69	483	198	67
Фон + ¹⁵ N50 локально	379	203	111	617	323	112
Нижняя часть склона, 5–7°						
P50K50 (фон)	130	–	–	198	–	–
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	203	84	82	336	138	75
Фон + ¹⁵ N50 локально	259	138	127	423	226	128
<i>P</i> , %	2.4			3		
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	24			30		
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	14			21		
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	14			14		

Газообразные потери азота удобрения при выращивании зерновых культур на приводораздельной части склона, наоборот, снижались в 1.3–1.8 раза, азота почвы – в 1.4–1.5 раза, а при выращивании трав азота удобрения – в 1.3–3.0 раза и азота почвы – в 1.2 раза по сравнению с нижней частью склона. В верхней приводораздельной части склона при выращивании многолетних бобово-злаковых трав газообразные потери симбиотического азота сокращались в 1.4–3.5 раза по сравнению с нижней частью склона.

При локальном способе применения азотного удобрения в 1.3–1.4 раза возрастало потребление азота удобрения зерновыми культурами и в 1.5–1.6 раза – многолетними бобово-злаковыми травами по сравнению с разбросным способом его внесения. При этом было больше в 1.2 раза потребление почвенного азота зерновыми культурами и травами и в 1.3–1.6 раза – симбиотического азота многолетними травами.

При локализации удобрения N_a в 1.4–1.5 раза увеличивалась иммобилизация ¹⁵N и N почвы под зерновыми культурами, а также в 1.1–1.3 раза – симбиотического азота под многолетними травами. Локальный способ применения N_a обеспечивал снижение газообразных потерь ¹⁵N в 1.4–1.8 раза и в 1.9–2.1 раза азота почвы при выращивании зерновых культур, а также в 1.6–3.3 и в 2.1–6.3 раза при выращивании трав соответственно. При выращивании трав сокращались потери симбиотического азота в 1.6–7.2 раза, что повышало экологическую устойчивость агрофитоценоза на обоих элементах склона.

Локальное внесение N_a увеличивало на 26–28% массу зерна и на 19–26% биомассу многолетних трав по сравнению с разбросным способом. Содержание сырого белка в зерне зерновых культур возрастало на 0.3–1.1%, в сене трав 2-го года жизни – на 3.9–5.4%, в сене трав 3-го года жизни – на 3.4–3.5%.

Агрофитоценоз многолетних бобово-злаковых трав функционировал в более устойчивом состоянии по сравнению с зерновыми культурами. Аг-

Таблица 8. Содержание сырого белка в зерне зерновых культур (средние в 3-х ротациях), % на сухое вещество

Вариант	Культуры		
	озимая рожь	овес	ячмень
Приводораздельная часть склона, 2–3°			
P50K50 (фон)	6.8	7.4	7.7
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	7.4	9.2	8.4
Фон + ¹⁵ N50 локально	8.3	10.5	9.3
Нижняя часть склона, 5–7°			
P50K50 (фон)	5.8	6.9	6.3
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	7.0	9.1	7.4
Фон + ¹⁵ N50 локально	7.6	9.8	8.1
<i>P</i> , %	46	4	3
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	0.9	1.2	0.9
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	0.7	0.8	0.6
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения, г/м ²	0.5	0.7	0.5

Таблица 9. Продуктивность и качество биомассы многолетних бобово-злаковых трав

Вариант	Биомасса сена, г/м ²	Прибавка				Сырой белок, %
		к фону		от локализации		
		1	2	1	2	
Травы 2-го года жизни						
Приводораздельная часть склона, 2–3°						
Р30К30 (фон)	493	–	–	–	–	17.8
Фон + ¹⁵ N30 вразброс	620	120	26	–	–	20.8
Фон + ¹⁵ N30 локально	726	232	51	112	19	26.2
Нижняя часть склона, 5–7°						
Р30К30 (фон)	356	–	–	–	–	16.6
Фон + ¹⁵ N30 вразброс	444	75	25	–	–	19.4
Фон + ¹⁵ N30 локально	531	175	55	87	20	23.3
<i>P</i> , %	3					4
<i>HCP</i> ₀₅ частные средние, г/м ²	42					3.2
<i>HCP</i> ₀₅ рельеф, г/м ²	24					2.2

рофитоценоз злаковых культур находился в зоне резистентности (на более низком уровне устойчивости). Более высокая устойчивость агрофитоценоза трав достигалась за счет дополнительного (лучшего) использования биологического азота, большей его иммобилизации и меньших потерь. При этом бобово-злаковые травы 3-го года жизни уступали травам 2-го года жизни на всех элементах склона при обоих способах применения азотного удобрения.

При разбросном способе внесения ¹⁵N мигрировал вниз по склону от места его внесения на расстояние 5 м в первый год, 9 м – на 3-й год и 55 м – через 15 лет на приводораздельной части склона (2–3°) и на 8, 13 и 72 м соответственно в нижней части склона (5–7°).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.Л. Почвенный покров России в условиях глобальных вызовов // Вестн. РАН. 2015. Т. 85. № 11. С. 984–992.
2. Завалин А.А., Соколов О.А. Потоки азота в агроэкосистеме: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней. М.: ВНИИА, 2016. 591 с.
3. Кудяров В.Н. Оценка питательной деградации пахотных почв России // Вестн. РАН. 2015. Т. 85. № 9. С. 771–775.
4. Кореньков Д.А. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений. М.: Агроконсалт, 1999. 296 с.
5. Кореньков Д.А., Борисова Н.И., Васенева Л.В., Семенов Ю.И. Превращения изотопно-меченого иммобилизованного азота удобрений в системе почва–растение в полевых условиях за 14 лет // Применение ¹⁵N в агрохимических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1988. С. 32–34.
6. Smith C.J., Chalk P.M. The residual value of fertiliser N in crop sequences: An appraisal of 60 years of research using ¹⁵N tracer // Field Crops Res. 2018. V. 217. P. 66–74.
7. Помазкина Л.В. Новый интегральный подход к оценке режимов функционирования агроэкосистем и экологическому нормированию антропогенной нагрузки, включая техногенное загрязнение почв // Усп. совр. биол. 2004. Т. 124. № 1. С. 66–76.
8. Турчин Ф.В. Использование азотных удобрений урожаем и его превращение в почве // Журн. ВХО. 1965. Т. 10. № 4. С. 400–401.
9. Fried M., Dean J. Concerning the measurement of available soil nutrients // Soil Sci. 1952. V. 73. № 4. P. 263–271.
10. Трепачев Е.П. Агроэкологические аспекты биологического азота в современном земледелии. М.: Агроконсалт, 1999. 531 с.
11. Jnselsbacher E., Wanek W., Strauss J. A novel ¹⁵N tracer model reveals: Plant nitrate governs nitrogen transformation rates in agricultural soils // Soil Biol. Biochem. 2013. V. 57. P. 301–310.
12. Сычев В.Г., Соколов О.А., Завалин А.А., Шмырева Н.Я. Роль азота в интенсификации продукционного процесса сельскохозяйственных культур // Экологические аспекты роли азота в продукционном процессе. М.: ВНИИА, 2012. Т. 2. 272 с.

13. *Kleinebecker T., Holzel N., Prati D.* Evidence from the real world: ^{15}N natural abundances reveal enhanced nitrogen use at high plant diversity in Central European grassland // *J. Ecol.* 2014. V. 102. P. 456–465.
14. *Kriszsan M., Amelung W., Schellberg J.* Longterm changes of delta ^{15}N natural abundance of plants and soil in a temperate grassland // *Plant and Soil.* 2009. V. 325. P. 157–169.
15. *Соколов О.А., Шмырева Н.Я., Завалин А.А., Черников В.А.* Роль симбиотического азота и устойчивости его циклов при выращивании многолетних трав на склоне // *Плодородие.* 2016. № 1. С. 50–52.
16. *Pardo L.H., Templer P.H., Goodale C.L.* Regional assessment of N saturation using foliar and root $\delta^{15}\text{N}$ // *Biogeochemistry.* 2006. V. 80. P. 143–171.
17. *Rascher K.G., Hellman C., Maguas C.* Community scale ^{15}N -isoscapes: tracing the spatial impact of an exotic N_2 -fixing invader // *Ecol. Lett.* 2012. V. 15. P. 484–491.

Flows of ^{15}N , Soil and Symbiotic Nitrogen in Sod-Podzolic Eroded Soil

A. A. Zavalin^{a,#}, N. Ya. Shmyreva^a, and O. A. Sokolov^a

^a D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia

[#] E-mail: zavalin.52@mail.ru

In microfield experiment using labeled ^{15}N nitrogen fertilizer on an eroded sod-podzolic medium loamy soil for 15 years when growing crops and perennial leguminous grasses of the 2nd and 3rd years of life, nitrogen fluxes were studied in the fertilizer system–soil–plants. Cultivated crops consumed 1.3–1.5 times more nitrogen of fertilizer (^{15}N), soil and symbiotic nitrogen on the drive-divide part of the slope compared to its lower part. In the soil of the drive-divide part of the slope, 1.3–1.4 times more is immobilized and 15–3.0 times less ^{15}N is lost than in the lower part of the slope. With the local method of applying nitrogen fertilizer, crop rotation crops consumed 1.3–1.6 times more than ^{15}N , 1.2 times soil nitrogen and 1.3–1.6 times symbiotic nitrogen compared to the spread method. With the localization of nitrogen fertilizer, the immobilization of nitrogen fertilizer and symbiotic and soil mineralization under crop rotation crops increased 1.1–1.5 times on all elements of the slope. Gaseous nitrogen losses, on the contrary, decreased 1.4–7.2 times. When nitrogen fertilizer is applied locally, grain biomass increases by 26–28%, grass hay by 19–26%, crude protein content increases by 0.3–1.1% in grain by 3.4–5.4% in perennial grass hay. Agrophytocenosis of perennial leguminous-grasses functioned in a more stable state compared with cereals, this is achieved due to the additional use of biological nitrogen, its greater immobilization and less nitrogen loss. With the spread method of application, ^{15}N migrated down the slope from the site of application to a distance of 5 m in the first year, 9 m in the third year, and 55 m after 15 years on the drive-divide part of the slope (2–3°) and 8 m, 13 m and 72 m, respectively, in the lower part of the slope (5–7°).

Key words: nitrogen fertilizer, ^{15}N isotope, nitrogen fluxes, immobilization, mineralization, agrocenosis stability, eroded soil.