

АГРОХИМИЯ И ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ

УДК 631.811.1:631.874:631.862:633.11.13.16:631.416.1

ЦИКЛЫ, БАЛАНС АЗОТА И УСТОЙЧИВОСТЬ АГРОЭКОСИСТЕМЫ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ (ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ^{15}N)

© 2022 г. А. А. Завалин^а, * , О. А. Соколов^а, Н. Я. Шмырева^а, С. В. Лукин^б, А. С. Авилов^с

^аВсероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова,
ул. Прянишникова, 31а, Москва, 127434 Россия

^бБелгородский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Победы, 85, Белгород, 308015 Россия

^сЦентр агрохимической службы “Белгородский”, ул. Щорса, 8, Белгород, 308027 Россия

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

Поступила в редакцию 26.11.2020 г.

После доработки 09.06.2021 г.

Принята к публикации 30.06.2021 г.

В стабилизации циклов азота и в устойчивом развитии агроэкосистем существенную роль играет азот органических удобрений. При внесении биомассы сидеральных культур в качестве органических удобрений усиливается иммобилизация их азота в почве, сокращаются использование азота растениями и его газообразные потери по сравнению с минеральными азотными удобрениями. При совместном применении биомассы сидеральных культур и азотных минеральных удобрений уменьшается иммобилизация азота в почве, усиливается его использование растениями и возрастают газообразные потери. Внесение навоза уменьшает газообразные потери азота биомассы сидеральных культур. При использовании в качестве удобрения биомассы овса и тимофеевки потребление их азота и почвенного азота растениями сокращается на 18–36 и 6–36% соответственно, усиливается иммобилизация азота в почве и на 17% уменьшаются его газообразные потери по сравнению с аналогичными показателями варианта с внесением минеральных азотных удобрений.

Ключевые слова: ^{15}N , меченая ^{15}N биомасса трав, баланс азота, минерализация, иммобилизация, дерново-подзолистая почва, Stagnic Retisol, чернозем типичный, Naplic Chernozem (Loamic, Pachic)

DOI: 10.31857/S0032180X22010130

ВВЕДЕНИЕ

В условиях ограничения ресурсов и для сохранения устойчивого развития агроэкосистем, поддержания почвенного плодородия, оптимизации продукционного процесса, стабилизации качества продукции требуется совершенствование использования органических удобрений, разработка экологически безопасных технологий их применения [9, 19]. Под устойчивостью агроэкосистемы понимается ее свойство сохранять и поддерживать значения параметров и структуры в пространстве и времени, качественно не меняя характера функционирования.

Уровень внесения органических удобрений в 2019 г. в России составил всего 1.6 т/га посевной площади. Поэтому в земледелии возрастает роль многолетних бобово-злаковых и сидеральных культур, которые являются важными источниками поступления в пахотные почвы органического вещества и азота. Культуры — это двух-, трехкомпонентные травосмеси, в качестве злакового

компонента служат тимофеевка, костер, овсяница, ежа, райграс и др.; в качестве бобового компонента используют клевер, люцерну, эспарцет, донник. Бобово-злаковые травосмеси используют в качестве зеленого удобрения (сидерата) в составе севооборота, они служат кормовой базой для сельскохозяйственных животных. В смешанных посевах взаимоотношение бобовых растений со злаками обуславливает формирование высокопродуктивных экологически и экономически эффективных агрофитоценозов. С биомассой бобовых культур в агроценозы поступает большое количество легкоразлагаемых органических веществ, содержащих биологический азот, что способствует стабилизации гумусового состояния, улучшает физико-химические свойства, биогенность и фитосанитарное состояние почв [6, 7, 14, 16]. Поступая в почву, биомасса сидератов становится для микроорганизмов, фиксирующих молекулярный азот и осуществляющих трансформацию его соединений, энергетической основой жизнедеятельно-

Таблица 1. Характеристика сухой биомассы различных трав, меченых ^{15}N

Показатель	Опыт 1	Опыт 2			Опыт 3	
	горчица белая	тимофеевка	люпин	клевер	овес	тимофеевка
C/N	21	27	23	19	34	27
$N_{\text{общ}}$, %	3.3	2.0	2.80	2.50	1.58	1.84
^{15}N , ат. %	15.3	13.1	15.0	14.5	16.4	18.1
Доза N, внесенная с биомассой, г/м ²	6.01	5.01	5.04	5.02	5.03	5.05

сти. Вместе с тем остаются слабо изученными вопросы эффективности использования азота сидератов возделываемыми культурами, а также закономерности его трансформации в почве [5, 14, 24].

Цель работы – изучение параметров круговорота азота различных культур, используемых в качестве сидератов, при разных уровнях минерального питания.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в различных почвенно-климатических регионах страны: в нечерноземной (среднесуглинистая дерново-подзолистая почва (Albic Retisol (Loamic, Agric), Смоленск) и Центрально-Черноземной зонах (чернозем типичный тяжелосуглинистый (Haplic Chernozem (Loamic, Pachic)), Белгород). Изучали влияние различных видов трав. Для получения их биомассы, меченой ^{15}N , травы выращивали на отдельных участках в полевых условиях, под которые вносили высокообогащенные (свыше 90 ат. %) азотные минеральные удобрения.

Опыт 1. Изучение потоков и баланса азота биомассы горчицы белой при выращивании озимой пшеницы (сорт Губернатор Дона) проводили в микрополевым опыте (сосуды без дна размером 23 × 45 × 30 см) на черноземе типичном тяжелосуглинистом в лесостепной зоне Белгородской области. Удобрения в дозе $N_6P_6K_6$ г/м² вносили осенью перед посевом. Из азотных минеральных удобрений применяли мочевины, меченую ^{15}N , – 13.3 ат. %. В качестве фосфорных и калийных удобрений применяли двойной суперфосфат и калий хлористый. Схема опыта предусматривала следующие варианты: P_6K_6 (фон), фон + ^{15}N горчица в количестве, эквивалентном по азоту N_6 , фон + $^{15}\text{N}_m$ (табл. 1), фон + 2/3 дозы ^{15}N горчица + 1/3 дозы N_m .

Меченую ^{15}N биомассу горчицы получали за год до закладки основного опыта. Для этого горчицу белую выращивали на отдельном участке, под которую вносили высокообогащенный ^{15}N

сульфат аммония (92.2 ат. % ^{15}N): растения убрали в период массового цветения, сушили в тени для воздушно-сухого состояния, измельчали на отрезки 0.3–0.5 см и осенью вносили в дозе 6.01 г N/м² в качестве азотного удобрения (содержание N 3.3%, обогащение ^{15}N 15.3 ат. %) на фоне P_6K_6 . Все дозы используемых трав указаны по содержанию в них азота, что позволяет сравнить доступность и эффективность их внесения. Гидротермический коэффициент (ГТК) за вегетационный период произрастания озимой пшеницы составил 0.9 к среднегодовому значению 1.2. Температура воздуха за вегетационный период была ниже в 1.0 раза, количество выпавших осадков в 1.3 раза меньше по сравнению со средней многолетней нормой.

Опыт 2. Исследования баланса азота биомассы различных трав, меченых ^{15}N , при выращивании овса (сорт Скакун) проводили в микрополевым опыте на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве в Смоленской области. Площадь опытных делянок составляла 0.5 м² (0.5 × 1.0 м). Предварительно на исследуемой почве высевали люпин узколистный, клевер красный и тимофеевку луговую, под которые вносили сульфат аммония, обогащенный ^{15}N (>95 ат. %). В итоге была получена сухая биомасса с исходным обогащением ^{15}N 13.1–15.0 ат. % и содержанием общего азота в пределах от 2.0 до 2.8%, которую затем измельчали на отрезки 0.5–1.0 см и осенью вносили в почву в дозе 5.01–5.04 г/м² на фоне фосфорных и калийных удобрений P_5K_5 (применяли двойной суперфосфат и калий хлористый соответственно). ГТК за период вегетации овса составил 1.4 к среднегодовому значению 1.7. Температура воздуха за вегетационный период была выше в 1.1 раза, а количество выпавших осадков в 1.2 меньше по сравнению со среднегодовым значением.

Опыт 3. Изучение потоков и баланса азота биомассы овса и тимофеевки, меченой ^{15}N , при выращивании ячменя (сорт Носовский 9) проводили в микрополевым опыте (сосуды без дна размером 50 × 50 × 40 см) на той же почве, что и в опыте 2. Для проведения исследований предварительно выращивали овес и тимофеевку, под

Таблица 2. Агрохимическая характеристика почв опытных участков

Показатель	Опыт 1	Опыты 2 и 3
Содержание органического вещества по Тюрину, %	5.0	2.1
pH _{сол}	6.5	5.7
Гидролитическая кислотность (Нг), смоль(экв)/кг	1.32	1.2
Содержание общего азота по Кьельдалю–Йодльбауэру, %	0.23	0.09
Содержание обменных форм, ммоль/100 г почвы	Ca ²	5.5
	Mg ²⁺	2.81
Содержание подвижных форм, мг/кг	P ₂ O ₅	118*
	K ₂ O	140*

* По методу Чирикова.

** По методу Кирсанова.

которые вносили сульфат аммония с высоким (>95 ат. %) обогащением ¹⁵N. В результате получили биомассу овса и тимофеевки, которую измельчали и осенью вносили в почву в дозе 5.03–5.05 г азота на м² на фоне фосфорного и калийного удобрений P₅K₅ (применяли двойной суперфосфат и калий хлористый). Навоз полуперепревший (С – 32%, N_{общ} – 1.16%) применяли из расчета 10 т/га. Азотные удобрения в форме сульфата аммония (обогащением ¹⁵N 26.85 ат. %) вносили в дозе из расчета 5 г азота на м² на фоне P₅K₅ перед посевом ячменя на глубину 10 см. Метеорологические условия для выращивания ячменя складывались благоприятными, ГТК за период вегетации растений составил 1.7, что соответствует среднегодовому значению.

Агрохимическая характеристика почв опытных участков представлена в табл. 2. Минеральный (остаточный) азот в почве определяли, как суммарный аммонийный азот, поскольку нитраты предварительно восстанавливали с помощью сплава Дебарда [10]. В растительных и почвенных образцах общий азот определяли по общепринятому классическому методу Кьельдаля–Йодльбауэра в лаборатории минерального и биологического азота. Изотопный состав азота в почвенных и растительных образцах определяли на масс-спектрометре “Delta V” в лаборатории междисциплинарных исследований ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова.

Количество азота меченого удобрения, находящегося в растениях или оставшегося в почве после выращивания растений, определяли по уравнению:

$$N_{уд} = \frac{N_{общ}(c-v)}{(a-b)},$$

где N_{уд} – количество азота меченого удобрения в растениях (почве); N_{общ} – количество общего азота в растениях (почве); а – ат. % ¹⁵N в азоте меченого удобрения; в – ат. % ¹⁵N в азоте немеченых

растений (почвы); с – ат. % ¹⁵N в азоте меченых растений (почвы).

Для определения баланса азота были взяты данные по использованию азота удобрения и иммобилизации азота в почве. Азот газообразных соединений определяли по разнице между дозой азота и суммой азота, использованного растениями, и закрепления в почве.

Расчеты потоков азота удобрения и азота почвы проводили по формулам [11]:

$$\text{Иммобилизованный азот } N_c = N_a \times {}^{15}N_c / {}^{15}N_a;$$

$$\text{Газообразные потери азота } N_d = N_a \times {}^{15}N_d / {}^{15}N_a;$$

$$\text{Минерализованный азот } M = N_a + N_b + N_c + N_d;$$

$$\text{Нетто-минерализованный азот } H-M = M - (N_c + N_b);$$

$$\text{Реиммобилизованный азот } PИ = M - H-M,$$

где N_a – вынос общего азота с урожаем; ¹⁵N_a – использование азота удобрения; ¹⁵N_c – иммобилизованный азот удобрения; N_b – остаточный минеральный азот; ¹⁵N_d – газообразные потери азота удобрения.

Для определения степени устойчивости использовали критерии интегральной оценки (классификации) режимов функционирования экосистем и уровней воздействия на них (табл. 3).

Данные по урожаю зерна озимой пшеницы, овса и ячменя обрабатывали методом дисперсионного анализа (STAT VNIIA), достоверность различий оценивали по критерию Фишера F.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Положительное влияние горчицы на агрофизические и агрохимические свойства почвы в литературе освещено достаточно полно. Вопрос об участии азота горчицы в круговороте азота и продукционном процессе возделываемых культур изучен недостаточно [3, 8, 13, 18].

Таблица 3. Критерии режимов функционирования агроэкосистем [11]

Режим функционирования	Уровень воздействия	Критерий	
		РИ:М, %	Н-М:РИ, %
Гомеостаз	Норма	50 ± 5	0.8–1.2
Стресс	Допустимый	45–30	1.2–2.5
Резистентность	Предельно допустимый	30–20	2.5–4.2
Адаптационное истощение	Критический	20–10	4.2–9.0
Репрессия	Недопустимый	<10	>9.0

На черноземе типичном озимая пшеница использовала меньше азота горчицы по сравнению с мочевиной (табл. 4). Внесение мочевины совместно с горчицей усиливало потребление пшеницей азота ее биомассы. При этом в почве закреплялось больше азота биомассы горчицы и меньше его терялось, чем азота мочевины.

На дерново-подзолистой почве овес лучше использовал азот биомассы клевера, его меньше закреплялось в почве и терялось в газообразной форме. Азот тимофеевки использовался овсом в меньшей степени и существенно больше подвергался иммобилизации. При этом овес лучше ис-

пользовал не только азот биомассы клевера, но и азот почвы. По данным литературы, на одну единицу азота клевера овес потреблял 2.6 ед. азота почвы, тогда как на единицу азота тимофеевки – 1.4 ед. азота почвы [19, 22]. Азот биомассы клевера более активно включается в микробную биомассу и легче включается в синтез гуминовых кислот органического вещества почвы [20, 32, 33].

Ячмень потреблял значительно меньше азота биомассы овса и тимофеевки (в 1.6 раза), при этом усиливалась иммобилизация их азота (в 1.3–1.6 раза) по сравнению с минеральными азотными удобрениями. Иммобилизация азота биомассы овса и тимофеевки усиливалась при внесении навоза. Иммобилизация азота зеленой массы овса, меченой ^{15}N , сокращается при совместном ее внесении с минеральными удобрениями [15]. Иммобилизация азота биомассы клевера и горчицы белой также уменьшается при совместном ее применении с азотными удобрениями [12, 19].

При поступлении в почву свежего органического вещества с широким соотношением углерода к азоту (навоз) существенно возрастает активность автохтонной и зимогенной микрофлоры, формируется более активное и разнообразное сообщество микроорганизмов [21, 25, 27, 29].

При разложении растительного материала ведущую роль играет содержание азота [23, 26, 31]. Биомасса бобовых трав с более узким соотноше-

Таблица 4. Поток и баланс азота биомассы сельскохозяйственных культур при внесении органических удобрений, меченых ^{15}N

Вариант	Использование растениями		Иммобилизовано в слое почвы 0–40 см		Газообразные потери	
	г/м ²	% от дозы	г/м ²	% от дозы	г/м ²	% от дозы
Озимая пшеница						
Фон + ^{15}N -горчица	1.89	32	3.45	58	0.66	10
Фон + 2/3 ^{15}N -горчица + 1/3 $\text{N}_\text{м}$	2.37	40	2.73	45	0.90	15
Фон + $^{15}\text{N}_\text{м}$	2.64	44	1.58	33	1.38	23
Овес						
Фон + ^{15}N -клевер	1.85	37	2.76	55	0.41	8
Фон + ^{15}N -люпин	1.40	28	3.02	60	0.62	12
Фон + ^{15}N -тимофеевка	0.84	17	3.46	69	0.71	14
Ячмень						
Фон + ^{15}N -овес	1.30	26	2.74	55	0.96	19
Фон + ^{15}N -овес + H_{10}	1.60	32	2.80	58	0.60	12
Фон + ^{15}N -тимофеевка	1.50	30	2.84	57	0.66	13
Фон + ^{15}N -тимофеевка + H_{10}	1.68	34	2.92	58	0.40	8
Фон + $^{15}\text{N}_5$	2.04	41	1.66	33	1.30	26

* H_{10} – навоз, 10 т/га.

Таблица 5. Потоки азота почвы и удобрения при внесении биомассы овса и тимофеевки, меченых ^{15}N , под ячмень, г/м²

Вариант	Вынос азота почвы растениями	Остаточный минеральный азот	Иммобилизованный/реимобилизованный азот почвы	Газообразные потери азота почвы	Минерализованный азот (М)	Нетто-минерализованный азот (Н-М)	Реимобилизованный азот (РИ)	Азот удобрений, использованный растениями	Иммобилизованный азот удобрения	Газообразные потери азота удобрения
Фон + $^{15}\text{N}_5$	10.3	2.55	15.11	11.83	39.52	24.41	12.56	2.04	1.66	1.30
Фон + ^{15}N -овес	6.38	1.94	24.93	8.74	41.89	16.93	23.09	1.30	2.74	0.96
Фон + ^{15}N -овес + Н ₁₀	7.88*	1.51*	25.48	5.46	40.33	14.85	23.97	1.60	2.80	0.60
Фон + ^{15}N -timoфеевка	7.36	1.71	25.84	6.01	40.92	15.08	24.13	1.50	2.84	0.66
Фон + ^{15}N -timoфеевка + Н ₁₀	9.25*	1.67*	26.57	3.64	41.13	14.56	24.90	1.88	2.92	0.40

* N почвы + N навоза.

нием C/N первоначально минерализовалась быстрее, чем биомасса злаковых трав [28, 34]. По мере сужения соотношения углерода к азоту (timoфеевка, навоз) усиливается иммобилизация азота в почве. С более узким соотношением C/N биомасса разлагается быстрее и минимизирует обогащение почвы гумусом [30]. Увеличение содержания органического углерода в почве с навозом достигает 6.4–9.8%, с соломой – 3.7–5.2%, тогда как при внесении биомассы сидератов содержание гумуса может даже уменьшаться. Чем интенсивнее закрепление азота в почве, тем меньше газообразные потери [21, 27].

Газообразные потери азота овса и тимофеевки существенно меньше (в 1.4 и 2 раза соответственно) по сравнению с азотными удобрениями. Навоз дополнительно сокращал потери азота биомассы овса и тимофеевки (в 1.6 раза). По литературным данным потери азота растительных остатков из почвы уменьшаются в 1.3–1.5 раза по сравнению с азотными удобрениями [15]. Под действием биомассы сидератов и зерновых культур газообразные потери азота минеральных удобрений сокращаются в 1.3–2.4 раза, а потери азота почвы – в 1.6 раза.

Изменение интенсивности внутрипочвенного цикла азота, роли соотношения в интегральной оценке степени устойчивости, урожае зерновых культур оценены по методике [11]. Минерализованный за период вегетации растений азот почвы (М) можно рассматривать как “вход” вещества в экосистему. Нетто-минерализованный азот (Н-М), то есть количество минерального азота, которое используется растениями и теряется в виде газообразных соединений, является “выходом”, а

“возвратом на выходе” служит реимобилизованный азот (РИ), идущий на поддержание устойчивого состояния системы [17]. Согласно этим формулам получены данные по минерализации почвенного азота (табл. 1 и 5).

В зависимости от применяемых видов удобрений (биомасса овса и тимофеевки) менялась интенсивность процессов внутрипочвенного цикла азота (минерализация ↔ иммобилизация/реимобилизация) (табл. 5). Под действием биомассы и навоза вследствие активизации процессов иммобилизации/реимобилизации одновременно усиливалась минерализация почвенного органического вещества, тогда как его нетто-минерализация уменьшалась по сравнению с действием азотных удобрений. При этом под действием биомассы сокращалась доля нетто-минерализации почвенного азота (36–40% от минерализованного азота) по сравнению с азотными удобрениями (62%). Усиление иммобилизации почвенного азота и уменьшение его нетто-минерализации связано с уменьшением численности нитрифицирующих бактерий под действием соломы [2]. Высокая доля нетто-минерализации азота почвы обеспечивала более интенсивные его газообразные потери по сравнению с биомассой овса и тимофеевки.

Органическое вещество биомассы овса и тимофеевки участвует в формировании органического вещества почвы за счет образования легкоподвижных продуктов гумификации [20, 32]. Усиление иммобилизации азота биомассы и почвенного азота при внесении полуперепревшего навоза, по-видимому, связано с включением их

азота в биомассу микроорганизмов, поступающих в почву с навозом [32].

Можно предположить, что при совместном применении бесподстильного навоза и соломы злаковых культур эффект будет заметнее, поскольку в навозе содержится большее количество азота в подвижной форме [2, 19].

Интегральным показателем устойчивости функционирования агроэкосистемы является отношение нетто-минерализованного азота (Н-М) к реиммобилизованному азоту (РИ), которое количественно характеризует зависимость между потоками азота, направленными в гетеро- и автотрофный циклы [4, 11, 24]. В статье [11] показаны параметры устойчивости по элементам круговорота азота в экосистеме, по критериям режима функционирования агроэкосистем. На черноземе типичном при внесении горчицы агрофитоценоз озимой пшеницы находился в зоне стресса при допустимом уровне воздействия (табл. 6). Однако при совместном внесении биомассы горчицы и мочевины агрофитоценоз находился на более низком уровне экологической устойчивости, чем при использовании только одной биомассы горчицы. Азотные минеральные удобрения немного уменьшали устойчивость системы, поскольку при их внесении возрастала минерализация и газообразные потери азота горчицы и почвы, сокращалась их иммобилизация/реиммобилизация [19].

На дерново-подзолистой почве при внесении в качестве “зеленого удобрения” биомассы тимофеевки агрофитоценоз сидератов находился в более устойчивом состоянии (в зоне гомеостаза при нормальном уровне воздействия), чем при внесении биомассы клевера и люпина (в пограничном состоянии между зонами гомеостаза и стресса), что обусловлено усилением минерализации азота сидератов и почвы. При внесении только минеральных азотных удобрений экологическая устойчивость агрофитоценоза оказалась более низкой, чем при внесении биомассы трав [19].

На дерново-подзолистой почве внесение в качестве сидератов только биомассы овса и тимофеевки, а также их совместное внесение с навозом приводило к увеличению устойчивости агрофитоценоза ячменя до режима гомеостаза при допустимом уровне воздействия. Происходит это вследствие большей иммобилизации/реиммобилизации азота биомассы овса и тимофеевки, культур с более широким соотношением С/Н [18, 20]. Биомасса злаковых и бобовых культур оказывает комплексное воздействие на функционирование агрофитоценоза: влияет на процессы минерализации — иммобилизации почвенного азота, улучшает фосфорный и калийный режимы почвы, положительно действует на агрофизические свойства почвы, повышает продуктивность фотосинте-

Таблица 6. Влияние применения минеральных и органических удобрений на показатели интегральной оценки функционирования агрофитоценозов

Вариант	Показатели устойчивости	
	РИ/М, %	(Н-М)/РИ
Озимая пшеница		
Фон + ¹⁵ N-горчица	44	1.1
Фон + 2/3 ¹⁵ N-горчица + 1/3 N _м	37	1.5
Фон + ¹⁵ N _м	33	1.9
Овес		
Фон + ¹⁵ N-клевер	44	1.1
Фон + ¹⁵ N-люпин	45	0.9
Фон + ¹⁵ N-тимофеевка	62	0.5
Ячмень		
Фон + ¹⁵ N-овес	55	1.4
Фон + ¹⁵ N-овес + Н ₁₀	59	1.6
Фон + ¹⁵ N-тимофеевка	59	1.5
Фон + ¹⁵ N-тимофеевка + Н ₁₀	60	1.7
Фон + ¹⁵ N ₅	32	1.9

за за счет дополнительной эмиссии CO₂ при ее разложении, что обеспечивает формирование более высокого урожая возделываемой культурой [29].

Продуктивность озимой пшеницы служит интегральным показателем усиления минерализации почвенного азота. Максимальная урожайность зерна озимой пшеницы достигалась при совместном внесении на черноземе типичном мочевины и биомассы горчицы, поскольку при этом усиливалась минерализация азота сидерата и почвы (табл. 7). Наименьшая урожайность озимой пшеницы отмечалась на варианте с внесением только биомассы горчицы, поскольку при этом сокращалось потребление растениями азота сидерата и почвы [1, 19].

Наиболее высокая урожайность зерна овса достигалась при внесении в дерново-подзолистую почву биомассы клевера, что обусловлено более активным использованием азота этого сидерата и почвы. При использовании в качестве “зеленого удобрения” биомассы тимофеевки урожайность зерна овса уменьшалась в 1.4 раза, а люпина — в 1.3 раза [33]. Это связано с тем, что при заделке в почву биомассы клевера, его азот активнее потребляется микроорганизмами, и он в большей части включается в гуминовые кислоты (по сравнению с азотом люпина и тимофеевки), обеспечивая лучшие условия питания растений азотом и увеличение урожайности зерна [20, 32].

При возделывании ячменя на дерново-подзолистой почве он на фоновом варианте P₅K₅ формировал такой же урожай зерна, что и овес. Наи-

Таблица 7. Урожайность сельскохозяйственных культур в зависимости от вида органических удобрений

Вариант	Урожайность зерна, г/м ²	Прибавка урожайности	
		г/м ²	%
Озимая пшеница			
Фон – P ₆ K ₆	664	–	–
Фон + ¹⁵ N-горчица	829	165	24.8
Фон + 2/3 ¹⁵ N-горчица + 1/3 N _м	875	211	31.8
Овес			
Фон – P ₅ K ₅	176	–	–
Фон + ¹⁵ N-клевер	384	208	118.2
Фон + ¹⁵ N-люпин	296	120	68.2
Фон + ¹⁵ N-тимофеевка	266	90	51.1
Ячмень			
Фон – P ₅ K ₅	185	–	–
Фон + ¹⁵ N-овес	304	119	64.3
Фон + ¹⁵ N-овес + N ₁₀	349	164	88.6
Фон + ¹⁵ N-тимофеевка	335	150	81.1
Фон + ¹⁵ N-тимофеевка + N ₁₀	376	191	103.2
Фон + ¹⁵ N ₅	432	247	133.5

большой урожай зерна ячмень формировал при внесении сульфата аммония за счет лучшего использования растениями азота удобрения и почвенного азота. При внесении биомассы овса и тимофеевки (отдельно или совместно с навозом) продуктивность ячменя уменьшалась на 13–30% по сравнению с азотными удобрениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В стабилизации циклов азота и в устойчивом развитии агроэкосистем существенную роль играет азот органических удобрений (биомасса сидеральных культур). При ее внесении усиливается иммобилизация азота в почве, уменьшаются использование азота растениями и его газообразные потери по сравнению с минеральными азотными удобрениями. При совместном применении биомассы сидеральных культур с азотными удобрениями сокращается иммобилизация азота в почве и увеличиваются использование его растениями и газообразные потери. Навоз сокращает газообразные потери азота биомассы сидеральных культур. При внесении биомассы овса и тимофеевки потребление их азота и почвенного азота растениями снижается на 18–36 и 6–36% соответственно, усиливается иммобилизация азота в почве и уменьшаются его газообразные потери. Сидеральные культуры увеличивают устойчивость агроэкосистемы до режима гомеостаза или стресса. Наибольшей устойчивостью обладает агроэкосистема при внесении биомассы тимофеевки. Азотные удобрения снижают устойчивость агроэкосистемы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авилов А.С., Соколов О.А., Завалин А.А., Шмырева Н.Я.* Трансформация азота биомассы горчицы белой в почве // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30. № 2. С. 29–31.
2. *Верниченко И.В.* Ассимиляция растениями аммонийного и нитратного азота и эндогенное образование нитратов (исследования с ¹⁵N). М.: РГАУ-МСХА, 2017. 248 с.
3. *Дедов А.В., Придворев Н.И., Верзилин В.В.* Воспроизводство плодородия черноземов в севообороте // Земледелие. 2003. № 4. С. 5–7.
4. *Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я.* Потоки азота в агрофитоценозе на дерново-подзолистой почве (исследование с ¹⁵N) // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 5. С. 17–21. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2018/5/17-21>
5. *Завалин А.А., Шмырева Н.Я., Соколов О.А., Авиллов А.С.* Использование азота горчицы белой озимой пшеницей в зависимости от способа внесения азотных удобрений // Земледелие. 2016. № 5. С. 15–17.
6. *Исаков А.Н., Лукашов В.Н.* Роль бобовых трав и бобово-злаковых травосмесей в создании кормовой базы и биологизации земледелия // Природообустройство. 2018. № 3. С. 105–108. <https://doi.org/10.26897/1997-6011/2018-3-105-109>
7. *Лошаков В.Г.* Зеленое удобрение как фактор повышения плодородия почв, биологизации и экологизации земледелия // Плодородие. 2018. № 2. С. 26–29. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2018.101.09>

8. *Мальшиева Ю.А., Полякова Н.В., Платонычева Н.В.* Содержание органического вещества в почве в звеньях севооборота с сидеральными культурами // Земледелие. 2008. № 2. С. 16–17.
9. *Мельников В.И.* Основные итоги и перспективы развития земледелия Белгородской области // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 1. С. 4–5.
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10101>
10. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями / Под ред. В.Д. Паникова. М.: ВНИИА, 1983. Ч. II. С. 52.
11. *Помазкина Л.В.* Новый интегрированный подход к оценке режимов функционирования агроэкоэко-систем и экологическому нормированию антропогенной нагрузки, включая техногенные загрязнения почв // Успехи современной биологии. 2004. Т. 124. № 1. С. 66–76.
12. *Серегин В.В., Ямышевский Ф.В., Муравин Э.А.* Использование ячменем меченого азота растительной массы бобовых культур с различным отношением С/Н при применении ингибитора нитрификации // Агрохимия. 2000. № 6. С. 42–57.
13. *Скорочкин Ю.П., Брюхова З.Я.* Сидеральный пар и солома – элементы биологизации земледелия в условиях Северо-Восточной части ЦЧР // Земледелие. 2011. № 3. С. 20–21.
14. *Соколов М.С.* Оздоровление почвы и биологизация земледелия – важнейшие факторы оптимизации экологического статуса агрорегиона (Белгородский опыт) // Агрохимия. 2019. № 11. С. 3–16.
<https://doi.org/10.1134/S0002188119110127>
15. *Суков А.А.* Усвоение растениями, закрепление в почве и потери азота растительных остатков // Агрохимия. 1979. № 6. С. 12–17.
16. *Сухопалова Т.П.* Экономическая эффективность возделывания льна-долгунца после предшественников с промежуточными посевами горчицы белой // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 9. С. 87–90.
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10919>
17. *Сычев В.Г., Черников В.А., Соколов О.А., Макаров Н.Б.* Энциклопедический словарь по агрохимии и агроэкологии. М.: ВНИИА, 2019. С. 203.
18. *Тимонов В.Ю., Картамышев Н.И., Чернышова Н.М.* Зеленые удобрения в севообороте // Земледелие. 2011. № 1. С. 16–18.
19. *Черников В.А., Лукин С.В., Завалин А.А., Шмырева Н.Я., Соколов О.А.* Потоки азота в агрофитоценозе при применении органических удобрений (исследования с ¹⁵N) // Агроэкология. 2015. № 4. С. 18–22.
20. *Шмырева Н.Я., Соколов О.А., Цуриков Л.Н.* Участие азота многолетних трав в формировании органического вещества дерново-подзолистой почвы // Плодородие. 2012. № 6. С. 25–27.
21. *Щапова Л.Н.* Микробная сукцессия при трансформации органического вещества // Почвоведение. 2004. № 8. С. 967–975.
22. *Cadisch G., Handuyanto E., Malamat N.* Recovery from legume prunings and priming effects are governed by the residue quality // Plant and soil. 1998. V. 205. № 2. P. 125–134.
23. *Crews T.E., Peoples M.B.* Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer agroecosystems // Nutrient Cycling Agroecosystems. 2005. V. 72. P. 101–120.
<https://doi.org/10.1007/s10705-004-6480-1>
24. *Denk T.R.A., Butterbach-Bahl K., Kiese R.* The nitrogen cycle: a review of isotope effects and isotope modeling approaches // Soil Biol. Biochem. 2017. V. 105. P. 121–137.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.11.015>
25. *Gaillard V., Chenu L., Recous S.* Carbon mineralization in soil adjacent to plant residues of contrasting biochemical quality // Soil. Biol. Biochem. 2003. V. 35. № 1. P. 93–99.
[https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00241-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00241-9)
26. *Jensen L.S., Salo T., Palmason F.* Influence of biochemical quality on C and N mineralization from a broad variety of plant materials in soils // Plant and Soil. 2005. V. 273. № 1–2. P. 307–326.
<https://doi.org/10.1007/s11104-004-8128-y>
27. *Jnselsbacher E., Wanek W., Strauss J.* A novel ¹⁵N tracer model reveals: Plant nitrate uptake governs nitrogen transformation rates in agricultural soils // Soil. Biol. Biochem. 2013. V. 57. P. 301–310.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.10.010>
28. *Hadas A., Kautsky L., Goek M., Kara E.E.* Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover // Soil. Biol. Biochem. 2004. V. 36. № 2. P. 255–266.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.09.012>
29. *Hooker T.D., Stark Y.M.* Carbon flow from plant detritus and soil organic matter to microbes-linking carbon and nitrogen cycling in semi-arid soils // Soil Sci. Soc. Amer. J. 2012. V. 76. № 3. P. 903–914.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0139>
30. *Nicolardot B., Recous S., Mary B.* Simulation of C and N mineralization during crop residue decomposition: a simple dynamic model based of the C : N ratio of the residues // Plant and Soil. 2001. V. 228. № 1. P. 83–106.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0139>
31. *Palm C.A., Gachengo C.N., Delve R.J.* Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database // Agric. Ecosyst. Environ. 2001. V. 83. № 1–2. P. 27–42.
[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00267-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00267-X)
32. *Shmyreva N.Ya., Sokolov O.A., Zavalin A.A.* Feature of nitrogen microorganism assimilation of perennial grasses phytomass of a different of erosion soil // Rus. Agricul. Sci. 2014. № 4. V. 40. P. 271–274.
<https://doi.org/10.31857/S2500-26272019436-38>
33. *Sokolov O.A., Shmyreva N.Ya., Zavalin A.A.* Nitrogen utilization by oat plants in agrosystem // Rus. Agricul. Sci. 2017. V. 105. P. 121–137.
<https://doi.org/10.3103/S1068367417040139>
34. *Thuries L., Pansu M., Feller C.* Kinetics of added organic matter decomposition in a Mediterranean sandy soil. Soil // Biol. Biochem. 2001. V. 33. № 7–8. V. 3. P. 997–1010.
[https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00003-7)
<http://www.fedstat.ru/indicators/stat.do> (дата обращения 20.10.2020).
35. <http://www.fedstat.ru/indicators/stat.do> (дата обращения 20.10.2020).

Cycles, Nitrogen Balance and Sustainability of Agroecosystems Using Organic Fertilizers Tagged ^{15}N

A. A. Zavalin^{1, *}, O. A. Sokolov², N. Ya. Shmyreva¹, S. V. Lukin², and A. S. Awilow³

¹Federal State Budget Scientific Institution All-Russian Research Institute of Agricultural Chemistry named after D.N. Pryanishnikova (FGBNU "All-Russian Research Institute of Agricultural Chemistry"), Moscow, 127550 Russia

²Belgorod State National Research University, Belgorod, 308015 Russia

³Belgorod Center for Agrochemical Service (FSBI "CAS "Belgorodsky"), Belgorod, 308027 Russia

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

Nitrogen of organic fertilizers plays a significant role in the stabilization of nitrogen cycles and in the sustainable development of agroecosystems. When phyto-weight of green manure crops is introduced as organic fertilizers, the immobilization of their nitrogen in the soil is enhanced, the use of nitrogen by plants and its gaseous losses are reduced compared to mineral nitrogen fertilizers. With the combined use of the phytomass of green manure crops and nitrogen fertilizers, the immobilization of nitrogen in the soil decreases, the use by plants increases, and its gaseous losses increase. The introduction of manure reduced the gaseous nitrogen loss of the phytomass of green manure crops. When using the phytomass of oats and timothy as a fertilizer, the consumption of their nitrogen and soil nitrogen by plants decreases by 18–36% and 6–36%, respectively, the immobilization of nitrogen in the soil increases and its gaseous losses decrease by 17% its gaseous losses compared to mineral nitrogen fertilizers.

Keywords: nitrogen isotope ^{15}N , labeled ^{15}N grass biomass, nitrogen balance, nitrogen flows of sideral crops, nitrogen of mineral fertilizers and soil nitrogen, mineralization, immobilization, stability, Staghic Retisol (Loamic Humic), Haplic Chernozem (Loamic, Pachic)