

КОЭФФИЦИЕНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ КУЛЬТУРАМИ АЗОТА УДОБРЕНИЙ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ (РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИЗОТОПОМ ^{15}N)

Н. Н. ЦЫБУЛЬКО

УО «Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета,
г. Минск, Республика Беларусь, 220070, e-mail: nik.nik1966@tut.by

(Поступила в редакцию 16.01.2026)

Обобщены многолетние данные, полученные в исследованиях с применением метода изотопной индикации ^{15}N , по коэффициентам использования азота удобрений сельскохозяйственными культурами (озимая рожь, озимая и яровая пшеница, яровой ячмень, горох с овсом на зерно, яровой рапс) на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах разной степени эродированности и дерново-подзолистых автоморфных и глееватых супесчаных почвах в зависимости от доз, сроков внесения и форм азотных удобрений.

Коэффициент использования азота удобрений разными сельскохозяйственными культурами на дерново-подзолистых почвах изменяется в широких пределах – от 23 до 56% и составляет в среднем около 40%. Он зависит уровня плодородия почв, доз, сроков внесения и форм азотных удобрений, возделываемой культуры. Дробное применение азота способствует увеличению коэффициента его использования, а при увеличении дозы азотных удобрений наблюдается его снижение.

Реальные значения коэффициентов использования азота удобрений можно получить при использовании метода изотопной индикации ^{15}N . Разностный метод определения коэффициентов использования приводит к их завышению на 12–71%. Обусловлено это тем, что при внесении азотных удобрений происходит дополнительное использование (мобилизация) растениями минеральных соединений азота почвы, создавая в результате эффект кажущегося увеличения коэффициентов использования азота вносимых удобрений.

Ключевые слова: азот, удобрения, изотоп ^{15}N , коэффициент использования, сельскохозяйственные культуры, дерново-подзолистые почвы.

This paper summarizes long-term data obtained in studies using the ^{15}N isotopic tracer method on the use coefficients of fertilizer nitrogen by agricultural crops (winter rye, winter and spring wheat, spring barley, peas with oats for grain, and spring rape) on sod-podzolic light loamy soils with varying degrees of erosion and sod-podzolic automorphic and gleyic sandy loam soils depending on the doses, timing of application, and forms of nitrogen fertilizers.

The utilization rate of fertilizer nitrogen by different agricultural crops on sod-podzolic soils varies widely, from 23 to 56%, averaging approximately 40%. It depends on soil fertility, the dose, timing, and form of nitrogen fertilizers, and the crop being cultivated. Split nitrogen application increases the utilization rate, while increasing the dose of nitrogen fertilizers leads to a decrease.

Actual nitrogen utilization rates can be obtained using the ^{15}N isotope labeling method. The difference method for determining utilization rates overestimates them by 12–71%. This is because the application of nitrogen fertilizers results in additional utilization (mobilization) of mineral nitrogen compounds in the soil by plants, creating a perceived increase in the applied fertilizers nitrogen utilization rates.

Key words: nitrogen, fertilizers, ^{15}N isotope, utilization rate, agricultural crops, sod-podzolic soils.

Введение

Опубликованные статистические данные свидетельствуют, что за последние 40 лет на долю минеральных удобрений приходилось 40% прироста производства продовольствия в мире [1]. Из минеральных удобрений в наибольших объемах применяются азотные удобрения, поскольку практически во всех почвах азот является одним из лимитирующих элементов минерального питания растений, определяющих продуктивность основных сельскохозяйственных культур. Так, по данным ФАО, потребление минеральных удобрений (NPK) в 2021–2022 годах составило 198,2 млн т, в том числе азотных удобрений – 111,3 млн т, или 56% [2].

В Беларуси по расчетам общая потребность в азотных удобрениях на 2021–2025 годы составляла 3353,0 тыс. т действующего вещества, или 670,6 тыс. тонн в год [3].

Азотные удобрения, обеспечивая продовольственную безопасность, могут оказывать при этом негативное воздействие на окружающую среду. В глобальном масштабе азот удобрений является крупнейшим источником закиси азота (N_2O), имеющей мощный (~ 300-кратный) потенциал глобального потепления по сравнению с диоксидом углерода и являющейся долгоживущим парниковым газом [4], концентрация которого в атмосфере увеличилась на 0,8 части на миллиард (ppb) в год от 300 ppb в 1980 г. до 332 ppb в 2020 г. [5].

В продукционном процессе сельскохозяйственных культур непосредственное участие принимают азот почвы и азот удобрения. При систематическом недостаточном применении азотных удобрений по экономическим причинам, или в органическом земледелии, растения потребляют азот из почвенного органического вещества, приводя к резкому снижению его запасов и соответственно

плодородия почвы. Поэтому стратегия и практика оптимизации азотного питания растений, обеспечивая получение высокой и устойчивой урожайности, должна способствовать повышению эффективности использования азота при сохранении и повышении органического вещества в почве.

В силу различных причин внесенные в почву азотные удобрения, не могут быть полностью использованы растениями и, как следствие, остатки удобрений могут приводить к загрязнению окружающей среды.

Эффективность использования азота (ЭИА, или в англоязычной литературе – Nitrogen Use Efficiency – NUE) – обобщающий термин для агрономической и физиологической оценок использования его в агроэкосистемах [6].

Интенсивность поглощения и включения азота в продукционный процесс определяется совокупностью процессов трансформации азота в почве, биологическими особенностями сельскохозяйственных культур и физиологическими процессами, происходящими в растении. Наибольшая эффективность использования азота достигается тогда, когда доступность его в почве синхронизирована с потреблением растениями [7, 8]. Асинхронность между тем, когда азот доступен и когда он необходим является одной из причин низкой величины ЭИА и его потерь [9, 10].

В научной литературе встречается ряд методов оценки эффективности использования азота [7]. В отечественной агрохимической науке и практике в системе критериев, определяющих агрономическую эффективность применения азотных удобрений, используется величина потребления азота, которая выражается в абсолютных значениях на единицу площади или продукции, а также коэффициент использования растениями азота удобрений (KI_N).

В практике мирового земледелия в течение с 1970 по 2010 г. величина KI_N для основных культур колебалась в среднем от 30 до 50 % [7, 11–16]. Средняя мировая величина KI_N для различных почвенных, природно-климатических условий и сельскохозяйственных культур составляет по оценкам 42 % [17]. Так, в Китае коэффициент использования азота удобрений для риса, пшеницы и кукурузы составляет только 26–28 %, для овощных культур – менее 20 %. Потери азота в окружающую среду достигают более 50 % в виде растворимых соединений (NO) и газообразных форм (преимущественно N_2 , N_2O) [18].

В Беларуси по результатам многолетних исследований с применением метода изотопной индикации ^{15}N , проведенных на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава, установлено, что коэффициент использования азота удобрений в среднем по всем культурам севооборота колеблется в пределах 44–49 % – на суглинистых почвах, 38–43 % – на супесчаных почвах и 33–36 % – на песчаных почвах. Более высокие показатели характерны для хорошо окультуренных почв. Низкий коэффициент использования азота удобрений установлен при выращивании картофеля на песчаных почвах низкого уровня плодородия – 24–26 %. При неблагоприятных гидротермических условиях вегетационного периода коэффициент использования азота удобрений может снижаться в 1,5 раз и более [19, 20].

Широкая вариабельность KI_N свидетельствует, с одной стороны, о существенной зависимости величины использования растениями азота удобрений от совокупности складывающихся условий питания растений, а с другой стороны, указывает на наличие большого числа приемов, с помощью которых можно повысить его величину.

Коэффициент использования растениями азота удобрений определяется преимущественно разностным методом, который представляет собой выраженное в процентах отношение потребления азота в вариантах с внесением азотных удобрений к потреблению его на контроле или фосфорно-калийном фоне. Применение в агрохимических исследованиях метода изотопной индикации позволило определять KI_N с использованием стабильного изотопа ^{15}N .

Коэффициенты использования азота удобрений при разностном способе их расчета, как правило, выше, чем при изотопном определении. Основная погрешность разностного метода определения коэффициента использования азота заключается в учете «экстра»-азота [21, 22].

Отмечается, что в некоторых полевых и микрополевых опытах получены разностные KI_N , превышающие 100 %, что не имеет реального логического смысла. Погрешность значительно возрастает, если KI_N в опытах с полным минеральным удобрением рассчитывается по отношению к варианту без удобрений, а не к РК-фону [23].

Цель работы – обобщение многолетних данных по коэффициентам использования азота удобрений сельскохозяйственными культурами на дерново-подзолистых почвах на основе метода изотопной индикации ^{15}N , сравнительная оценка коэффициентов использования азота, рассчитанных разностным и изотопным методами.

Основная часть

Объектами исследований являлись дерново-подзолистые легкосуглинистые неэродированные, средне- и сильноэродированные почвы на лессовидных суглинках, дерново-подзолистые автоморфные и глееватые супесчаные почвы на водно-ледниковых рыхлых супесях. Исследования проводили в микрополевых опытах. Площадь микроделянок опытов 1 м². Повторность в опытах 4-кратная. Минеральные удобрения вносили из расчета г/м² действующего вещества.

В опыте 1 на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве изучали дозы и сроки применения азотных удобрений под озимую рожь. Азотные удобрения применяли в виде меченого ¹⁵N раствора аммиачной селитры (¹⁵NH₄¹⁵NO₃) со степенью обогащения изотопом ¹⁵N 20 атомных %.

В опыте 2 на дерново-подзолистой супесчаной почве изучали дозы и сроки внесения азотных удобрений под озимую рожь и ячмень. Азотные удобрения применяли в виде меченого ¹⁵N раствора карбамида (CO(¹⁵NH₂)₂) с обогащением изотопом ¹⁵N 15 атомных %.

В опыте 3 на дерново-подзолистых автоморфной и глееватой супесчаных почвах изучали разные формы азотных удобрений при возделывании яровой пшеницы и гороха с овсом на зерно. Разные формы азотных удобрений вносили перед посевом в виде меченых ¹⁵N их растворов со степенью изотопного обогащения 15 атомных %.

В опыте 4 на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах разной эродированности изучали дифференцированные дозы азотных удобрений при возделывании озимой пшеницы и ярового рапса: Азотные удобрения применяли в виде меченого ¹⁵N раствора карбамида (CO(¹⁵NH₂)₂) со степенью обогащения изотопом ¹⁵N 15 атомных %.

Анализ растительных образцов на содержание общего азота проводили по Кьельдалю-Иодльбауэру после их мокрого озольения [24]. Изотопный состав азота в разные годы определяли на масс-спектрометрах МИ-2101В и «Thermo Finnigan MAT Delta plus Advantage».

Исследования с применением изотопа ¹⁵N позволили установить коэффициенты использования растениями азота удобрений, которые зависели от почвенных условий, биологических особенностей сельскохозяйственных культур, доз, сроков применения и форм азотных удобрений.

На дерново-подзолистой легкосуглинистой почве коэффициент использования азота озимой рожью при внесении N₉ (из расчета 90 кг/га) во время возобновления весенней вегетации растений составил 52 %. Дробное применение такой же дозы азота повышало КИ_N на 6–10 % (варианты 3 и 4). Коэффициент использования азота при внесении в два приема N₁₂ (N₉ – во время возобновления весенней вегетации + N₃ – в фазу колошения) составил 53 % (табл. 1).

Коэффициенты использования азота удобрений озимой рожью на легкосуглинистой почве, рассчитанные разностным методом, были выше по сравнению с изотопным методом на 22–27 % (в среднем на 23 %). Это обусловлено дополнительной мобилизацией почвенного азота при внесении азотных удобрений.

Таблица 1. Влияние доз и сроков внесения азотных удобрений на коэффициенты использования азота (в %) зерновыми культурами

Вариант опыта	Поглощено растениями азота, г/м ²		КИ _N , рассчитанные:		
	всего	в т. ч. из удобрения	разностным методом	изотопным методом	различия, %
Озимая рожь, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва (опыт 1)					
1. P ₈ K ₁₂ – фон	6,96	–	–	–	–
2. Фон + N ₉ *	14,05	4,68	79	52	27
3. Фон + N ₆ * + N ₃ **	14,64	5,55	85	62	23
4. Фон + N ₆ * + N ₃ ***	14,14	5,21	80	58	22
5. Фон + N ₉ * + N ₃ ****	16,02	6,36	75	53	22
HCP _{0,95}	1,30	–	–	–	–
Озимая рожь, дерново-подзолистая супесчаная почва (опыт 2)					
1. P ₆ K ₁₂ – фон	10,36	–	–	–	–
2. Фон + N ₆ *	15,91	2,44	92	41	51
3. Фон + N ₉ *	17,10	2,64	75	29	46
4. Фон + N ₆ * + N ₃ **	17,91	3,13	84	35	49
5. Фон + N ₉ * + N ₃ **	20,12	3,74	81	31	50
HCP ₀₅	1,38	–	–	–	–
Яровой ячмень, дерново-подзолистая супесчаная почва (опыт 2)					
1. P ₆ K ₁₂ – фон	8,77	–	–	–	–
2. Фон + N ₆	14,05	3,47	88	58	30
3. Фон + N ₉	16,18	4,71	82	52	30
4. Фон + N ₆ + N ₃ **	15,89	4,68	79	52	27
5. Фон + N ₉ + N ₃ **	16,70	5,72	66	47	19
HCP ₀₅	1,08	–	–	–	–

Примечание. Азотные удобрения вносили: N – до посева, N* – возобновление весенней вегетации растений, N** – фаза выхода в трубку растений, N*** – фаза раскрытия последнего листа (флаг-лист), N**** – фаза колошения.

На дерново-подзолистой супесчаной почве по сравнению с легкосуглинистой почвой коэффициенты использования азота растениями озимой ржи, рассчитанные изотопным методом, были значительно ниже – при одинаковых дозах и сроках применения азотных удобрений на 22–27 %. В варианте с внесением N₆ (из расчета 60 кг/га) во время возобновления весенней вегетации растений КИ_N составил 41 %, а при увеличении дозы азота до N₉ снизился до 29 % (на 12 %). Дробное применение 9 г/м² азота повысило коэффициент его использования по сравнению с однократным на 6 %. Коэффициент использования азота при внесении N₁₂ в два приема (N₉ – при возобновлении весенней вегетации + N₃ – в фазу выхода в трубку растений) составил 31 %.

Коэффициенты использования азота растениями озимой ржи на супесчаной почве, полученные разностным методом, колебались в зависимости от доз и сроков внесения азотных удобрений от 75 до 92 %, что выше по сравнению с КИ_N, рассчитанных изотопным методом, в 2,2–2,6 раза.

При возделывании ярового ячменя на дерново-подзолистой супесчаной почве значения коэффициентов использования азота колебались в зависимости от доз и сроков внесения азотных удобрений от 47 до 58 % при определении их изотопным методом и 66 до 88 % – расчете разностным методом. При увеличении дозы азота коэффициент использования его снижался.

Изучено влияние на использование азота предпосевного внесения разных форм азотных удобрений под яровую пшеницу и горох с овсом на зерно на дерново-подзолистых автоморфной и глееватой супесчаных почвах. Коэффициенты использования азота яровой пшеницей, полученные изотопным методом, колебались на автоморфной почве от 39 до 46 %, на глееватой почве – от 44 до 46 %. Самые низкие КИ_N (39 % и 44 %) отмечены в вариантах с применением карбамида, а наиболее высокие (46 %) при внесении КАС (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты использования азота (в %) яровой пшеницей и горохом в зависимости от форм азотных удобрений (опыт 3)

Вариант опыта	Поглощено растениями азота, г/м ²		КИ _N , рассчитанные:		
	всего	в т. ч. из удобрения	разностным методом	изотопным методом	различия, %
Яровая пшеница, дерново-подзолистая автоморфная супесчаная почва					
1. P ₉ K ₁₅ – фон	6,66	–	–	–	
2. Фон + N ₉ к	11,56	3,56	54	39	15
3. Фон + N ₉ а	12,40	4,12	64	46	18
4. Фон + N ₉ аа	12,27	4,14	62	46	16
5. Фон + N ₉ кас	12,34	4,19	63	46	17
HCP ₀₅	1,02	–	–	–	
Яровая пшеница, дерново-подзолистая глееватая супесчаная почва					
1. P ₉ K ₁₅ – фон	7,97	–	–	–	
2. Фон + N ₉ к	16,19	4,00	91	44	47
3. Фон + N ₉ а	16,21	4,08	91	45	46
4. Фон + N ₉ аа	15,74	4,10	86	45	41
5. Фон + N ₉ кас	16,43	4,16	94	46	48
HCP ₀₅	1,22	–	–	–	
Горох с овсом за зерно, дерново-подзолистая автоморфная супесчаная почва					
1. P ₆ K ₁₅ – фон	10,11	–	–	–	
2. Фон + N ₆ к	17,62	1,71	125	29	96
3. Фон + N ₆ а	16,32	1,32	103	22	81
4. Фон + N ₆ аа	16,56	1,30	107	22	85
5. Фон + N ₆ кас	17,17	1,19	118	20	98
HCP ₀₅	1,12	–	–	–	
Горох с овсом за зерно, дерново-подзолистая глееватая супесчаная почва					
1. P ₆ K ₁₅ – фон	10,84	–	–	–	
2. Фон + N ₆ к	17,87	1,65	117	27	90
3. Фон + N ₆ а	15,86	1,59	84	26	58
4. Фон + N ₆ аа	16,44	1,55	93	26	67
5. Фон + N ₆ кас	16,88	1,99	101	33	68
HCP ₀₅	1,24	–	–	–	

*Примечание. Nк – карбамид; Nа – сульфат аммония; Nаа – селитра аммиачная; Nкас – раствор карбамида и аммиачной селитры.

При предпосевном внесении разных форм азотных удобрений в дозе N₆ (из расчета 60 кг/га) под горох с овсом на зерно коэффициенты использования азота составили на автоморфной супесчаной почве 20–29 %, на глееватой супесчаной почве – 26–33 %. На автоморфной почве наиболее высоким КИ_N был в варианте с применением карбамида, на глееватой почве с применением КАС.

Следует отметить, что на бобово-злаковой смеси получены очень высокие KI_N , рассчитанные разностным методом, по ряду вариантов опыта превышающие 100 %. Причиной высоких коэффициентов использования азота является, во-первых, мобилизация «экстра»-азота, а во-вторых, фиксация атмосферного азота бобовым компонентом (горохом), которые учитываются при расчетах.

Изучено влияние азотных удобрений на использование азота удобрений растениями озимой пшеницы и ярового рапса на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах разной степени эродированности (неэродированные, среднеэродированные, сильноэродированные). На неэродированной и среднеэродированной почвах при двукратной азотной подкормке озимой пшеницы общей дозой N_{11} (из расчета 110 кг/га) в начале весенней вегетации (N_9) и в фазу выхода в трубку растений (N_2) коэффициенты использования азота составили 32 %, а на сильноэродированной почве несколько ниже – 25 % (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициенты использования азота озимой пшеницей и яровым рапсом при внесении азотных удобрений на почвах разной эродированности (опыт 4)

Эродированность почвы	Вариант опыта	Поглощено растениями азота, г/м ²		KI_N , рассчитанные:		
		всего	в т. ч. из удобрения	разностным методом	изотопным методом	различия, %
Озимая пшеница						
Неэродированная	Р ₄ К ₇ - фон	8,84	–	–	–	–
	Фон + $N_9^* + N_2^{**}$	15,64	3,53	62	32	30
	НСП ₀₅	1,170	–	–	–	–
Среднеэродированная	Р ₄ К ₇ - фон	6,31	–	–	–	–
	Фон + $N_9^* + N_2^{**}$	12,36	3,50	55	32	23
	НСП ₀₅	1,042	–	–	–	–
Сильноэродированная	Р ₄ К ₇ - фон	5,47	–	–	–	–
	Фон + $N_9^* + N_2^{**}$	10,27	2,75	44	25	19
	НСП ₀₅	0,964	–	–	–	–
Яровой рапс						
Неэродированная	Р ₃ К ₆ – фон	7,90	–	–	–	–
	Фон + $N_9 + N_2^*$	15,67	4,49	71	41	30
	НСП ₀₅	1,354	–	–	–	–
Среднеэродированная	Р ₃ К ₆ – фон	6,45	–	–	–	–
	Фон – $N_9 + N_2^*$	12,38	4,50	57	41	16
	НСП ₀₅	1,162	–	–	–	–
Сильноэродированная	Р ₃ К ₆ – фон	5,20	–	–	–	–
	Фон – $N_9 + N_2^*$	10,53	4,50	48	41	7
	НСП ₀₅	0,904	–	–	–	–

Примечание. Азотные удобрения вносили: N – перед посевом ярового рапса, N^* – возобновление весенней вегетации растений озимой пшеницы и фаза стеблевания растений ярового рапса, N^{**} – фаза выхода в трубку растений озимой пшеницы.

При применении азотных удобрений под яровой рапс (N_9 – перед посевом и N_2 – в фазу стеблевания растений) коэффициенты использования азота, полученные изотопным методом, не зависели от степени эродированности почвы и составили 41 %.

Как видно из полученных результатов, KI_N , рассчитанные разностным методом, снижаются по мере увеличения эродированности почвы как на озимой пшенице, так и на яровом рапсе. Данный факт объясняется тем, что на средне- и, особенно, на сильноэродированных почвах запасы минеральных (доступных растениям) соединений азота значительно ниже по сравнению с почвами, не подверженными эрозии. С увеличением эродированности почв уменьшается пул мобилизуемого почвенного азота («экстра»-азота) за вегетационный период.

Заключение

Коэффициент использования азота удобрений разными сельскохозяйственными культурами на дерново-подзолистых почвах изменяются в широких пределах – от 23 до 56 % и составляет в среднем около 40 %. Он зависит уровня плодородия почв, доз, сроков внесения и форм азотных удобрений, возделываемой культуры. Дробное применение азота способствует увеличению коэффициента его использования, а при увеличении дозы азотных удобрений наблюдается снижение.

Реальные значения коэффициентов использования азота удобрений можно получить при использовании метода изотопной индикации ¹⁵N. Разностный метод определения приводит к их завышению на 12–71 %. При внесении азотных удобрений происходит дополнительное использование растениями минерального азота почвы, что дает эффект кажущегося увеличения коэффициентов использования азота удобрений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Save and Grow // A policymaker's guide to the sustainable intensification of smallholder crop production. Rome: FAO, 2011. – 116 p.
2. International Fertilizers Association (IFA) <https://www.fertilizer.org/>.
3. Комплекс мероприятий по повышению плодородия и защите от деградации почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь на 2021–2025 годы / В.В. Лапа [и др.]; под ред. В. В. Лапа, Н. Н. Цыбулько; Национальная академия наук Беларуси, Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Институт почвоведения и агрохимии. – Минск: ИВЦ Минфина, 2021. – 148 с.
4. Winiwarter W., Höglund-Isaksson L., Klimont Z., Schöpp W., Amann M. Technical opportunities to reduce global anthropogenic emissions of nitrous oxide // *Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13:014011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9ec9>.
5. Башкин, В. Н. Повышение эффективности использования азота: проблемы и пути решения. Сообщение 1. Агрогеохимические подходы // *Агрохимия*. – 2022 – № 7. – С. 82–96.
6. Udvardi M., Below F. E., Castellano M. J., Eagle A. J., Giller K. E., Ladha J. K., Liu X., Maaz T. M., Nova-Franco B., Raghuram N., Robertson G.P., Roy S., Saha M., Schmidt S., Tegeder M., York L.M. and Peters J.W. A Research road map for responsible use of agricultural nitrogen // *Front. Sustain. Food Syst.* 2021. V. 5:660155. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.660155>.
7. Ladha J. K., Pathak H., Krupnik T. J., Six J., van Kessel C. V. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects // *Adv. Agron.* 2005. – V. 87. – P. 85–156. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(05\)87003-8](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(05)87003-8)
8. Robertson G. P. Nitrogen use efficiency in row crop agriculture: crop nitrogen use and soil nitrogen loss // *Ecology in Agriculture* / Ed. L.E. Jackson. N.Y., USA: Academic Press, 1997. P. 347–365.
9. Smith J., Yeluripati J., Smith P., Nayak D. Potential yield challenges to scale-up of zero budget natural farming // *Nat. Sustain.* 2020. V. 3. P. 247–252. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0469-x>
10. Robertson G. P., Vitousek P. M. Nitrogen in agriculture: Balancing the cost of an essential resource // *Annu. Rev. Environ. Resour.* – 2009. – V. 34. – P. 97–125. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.032108.105046>
11. Кудеяров, В. Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России / В. Н. Кудеяров // *Агрохимия*. – 2019. – № 12. – С. 3–15.
12. Smil V. Nitrogen and food production: Proteins for human diets // *Ambio* 2002. V. 31. P. 126–131. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.126>
13. Лукин, С. В. Агроэкологическое состояние и продуктивность почв Белгородской области / С. В. Лукин. – Белгород, 2016. 344 с.
14. Tilman D., Cassman K. G., Matson P. A., Naylor R., Polasky S. Agricultural sustainability and intensive production practices // *Nature*. 2002. V. 418. P. 671–677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>
15. Liu J., You L., Amini M., Obersteiner M., Herrero M., Zehnder A.J. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2010. V. 107. P. 8035–8040. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913658107>
16. Robinson N., Brackin R., Vinall K., Soper F., Holst J., Gamage H. Nitrate paradigm does not hold up for sugarcane // *PLoS ONE*. 2011. 6: e19045. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019045>
17. Zhang X., Davidson E.A., Mauzerall D.L., Searchinger T.D., Dumas P., Shen Y. Managing nitrogen for sustainable development // *Nature*. 2015. V. 528. P. 51–59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>
18. Miao Y., Stewart B.A., Zhang F. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review // *Agronomy for Sustainable Development*. Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 2011. V. 31. P. 397–414. <https://doi.org/10.1051/agro/2010034>
19. Семенов, Н. Н. Адаптивные системы применения азотных удобрений / Н. Н. Семенов. – Минск: БИТ «Хата», 2003. – 164 с.
20. Семенов, Н. Н. Инновационные технологии применения азотных удобрений: теория, методология, практика / Н. Н. Семенов. – Минск: ООО «Альфа-книга», 2020. – 320 с.
21. Цыбулько, Н. Н. «Экстра»-азот почвы в питании растений (результаты исследований с ^{15}N) / Н. Н. Цыбулько // *Земледелие и растениеводство*. – 2024. – № 4 (154). – С. 39–47.
22. Цыбулько, Н. Н. «Экстра»-азот в формировании урожайности сельскохозяйственных культур (результаты исследований с ^{15}N) / Н. Н. Цыбулько // *Земледелие и растениеводство*. – 2025. – № 2 (156). – С. 16–21.
23. Завалин, А. А. Коэффициент использования растениями азота удобрений и его регулирование / А. А. Завалин, О. А. Соколов // *Международный сельскохозяйственный журнал*. – 2019. – № 4 (370). – С. 71–75.
24. Почвы. Методы определения общего азота: ГОСТ 26107-84. – Введ. 07.01.85. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1985. – 6 с.