

УДК 631.81:631.816.1:631.445.25(470.314)

ПРИЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ДОЗ УДОБРЕНИЙ НА СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ ВЛАДИМИРСКОГО ОПОЛЬЯ

© 2025 г. В. В. Окорков*

Верхневолжский федеральный аграрный научный центр
601261, Суздальский р-н, Владимирская обл. п. Новый, ул. Центральная, 3, Россия
*E-mail: okorkovvv@yandex.ru

На серых лесных почвах Владимирского ополья в многолетнем стационарном опыте изучено влияние минеральных и органо-минеральных (NPK + навоз КРС) систем удобрения в севообороте на урожайность зерновых культур и однолетних трав. Установлено, что она на 84.3–98.5% зависела от запасов N-NO₃, сформированных в период вегетации культур. Эти запасы при совместном применении навоза КРС до 80 т/га за ротацию севооборота и однократно N80 в составе NPK под культуру не лимитировали ее урожайность. Предложено прогнозировать урожайность зерна и сена возделываемых культур исходя из взаимосвязи мобилизационного пула азота с запасами N-NO₃, формируемыми за вегетацию яровых культур и от отрастания до уборки озимых, и коэффициентам использования их на вынос азота зерном и соломой. Размеры формирования запасов N-NO₃ за вегетацию и коэффициенты использования их на вынос продукцией оценивают зональные научно-исследовательские учреждения; мобилизационный пул азота рассчитывают из справочной литературы, более корректно – из данных исследований научно-исследовательских учреждений. Для зерновых культур и однолетних трав 7-польного севооборота получено хорошее совпадение экспериментальной урожайности с рассчитанной. Достоверно установлено, что с повышением засушливости вегетационных периодов при возделывании яровых зерновых и однолетних трав возрастает роль мобилизационного пула азота в трансформации почвенного азота в его подвижные формы. Показано, что на серых лесных почвах Верхневолжья при применении органо-минеральных систем удобрения в 7-польном севообороте одинарная доза N40P40K40 является оптимальной при возделывании зерновых культур, N60–75 – при возделывании однолетних бобово-злаковых трав.

Ключевые слова: серые лесные почвы, Владимирское ополье, формирование запасов N-NO₃ за вегетацию, мобилизационный пул азота, зерновые культуры, однолетние травы, гидротермический коэффициент.

DOI: 10.31857/S0002188125030032, EDN: UQTKJT

ВВЕДЕНИЕ

Исследования по влиянию доз органических и минеральных удобрений на урожайность полевых культур на серых лесных почвах Владимирского ополья, динамику содержания в них подвижных форм азота (аммонийного и нитратного азота, их запасов в слое почвы 0–40 см), подвижного фосфора (по Кирсанову) и обменного калия (по Масловой) на качество продукции вели в стационарных опытах, заложенных в 1970–1972 гг. [1, 2] и в 1991–1993 гг. [2, 3] на 3 полях (закладках). На продуктивность культур в 7- и 8-польных севооборотах определяющее влияние оказало применение полного минерального удобрения. Эффективность и окупаемость прибавкой

фосфорно-калийных удобрений была существенно более низкой. Также более низкой отмечена и окупаемость эквивалентных доз навоза КРС по сравнению с полным минеральным удобрением. Не было установлено тесной взаимосвязи урожайности и продуктивности культур севооборотов с запасами в почве аммонийного азота.

Развитие и обобщение исследований в стационарном опыте на закладке 1991–1993 гг. было проведено в работах [4, 5]. Эти и последующие исследования [6–9] позволили разработать алгоритм оценки оптимальных доз применения удобрений на серых лесных почвах Верхневолжья при возделывании зерновых культур и однолетних трав.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Почва опытных полей – серая лесная средне-глинистая со следующей исходной характеристикой пахотного слоя: содержание гумуса – 2.6–3.7%, pH_{KCl} 5.1–5.5 ед., гидролитическая кислотность (H_T) – 3.2–3.5, сумма поглощенных оснований – 19.4–22.4 мг-экв/100 г, содержание подвижного фосфора (по Кирсанову) – 130–200, обменного калия (по Масловой) – 150–180 мг/кг почвы.

В начале 1-й ротации 8-польного севооборота было проведено известкование по полной гидролитической кислотности. На его фоне применяли различные дозы подстилочного навоза КРС (0, 40, 60 и 80 т/га), который вносили после уборки однолетних трав на сено (вико-овсяной и горохо-овсяной смесей), и ежегодно минеральные удобрения (0, P40K40, N40P40K40, N80P80K80), их сочетания. Во 2–4-й ротациях внесение продолжали при последствии известкования. В 3-й и 4-й ротациях из севооборота убрали пропашную культуру (картофель), которую выращивали 2-й культурой после занятого пара. Исследования вели в 7-польном севообороте: занятой пар (вико-овсяная и горохо-овсяная смеси) – яровая пшеница – овес с подсевом многолетних бобово-злаковых трав – травы 1-го года пользования – травы 2-го года пользования – яровая пшеница – ячмень. В качестве минеральных удобрений использовали N_{aa} , которую однократно вносили под предпосевную культивацию или под озимую пшеницу, P_c и P_d , K_x . Фосфорно-калийные удобрения применяли осенью под вспашку на глубину 20–22 см. Лишь под травы 1-го и 2-го годов пользования эти удобрения вносили поверхностно.

Агрохимические анализы почвы выполняли по методикам, изложенным в источнике [10]. Статистическую обработку результатов проводили с использованием программ STAT VIUA и EXCEL.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что 92.9–97.1% вариации урожайности на серых лесных почвах Ополя в 8- и 7-польных севооборотах было связано с влиянием органических и азота минеральных удобрений, на влияние фосфорно-калийных удобрений приходилось не более 4.3% вариации [4, 5].

Наиболее высокая окупаемость удобрений прибавкой урожая полевых культур в 4-й ротации 7-польного севооборота установлена при применении под них одинарной дозы полного минерального удобрения N40P40K40 [5]. Однако в этом случае в почве отмечали отрицательный баланс азота, фосфора и калия. Лишь при сочетании одинарной дозы NPK с дозами навоза КРС 40–60 т/га

за ротацию баланс азота и фосфора был положительным, но отрицательным – калия. Ежегодный отрицательный баланс калия (–3.6...–8.5 кг K_2O /га) сохранялся даже при сочетании одинарной дозы NPK с навозом КРС 80 т/га за ротацию. Но из-за высоких запасов калия в серых лесных почвах Ополя, использования его полевыми культурами из слоев почвы 20–40 см сочетание одинарной дозы полного минерального удобрения с дозами навоза КРС 40–80 т/га за ротацию в ближайшей перспективе не будет снижать эффективное плодородие серых лесных почв Ополя [5].

Из-за участия в питании возделываемых культур преимущественно нитратного азота были оценены размеры формирования запасов $N-NO_3$ за вегетационный период и их использование на формирование отдельных элементов урожая (на вынос зерном и соломой) в зависимости от доз удобрений, возделываемых культур и погодных условий [5]. Полученные коэффициенты использования сформированных за вегетацию запасов $N-NO_3$ были менее варьирующими, чем разностные коэффициенты использования азотных удобрений. В табл. 1 приведены математические зависимости между средними формируемыми за вегетацию запасами $N-NO_3$ и урожайностью возделываемых культур в зависимости от систем удобрения.

Формы уравнений квадратичных зависимостей при однократном (в один срок) внесении аммиачной селитры свидетельствовали о том, что в вариантах, удобренных азотом минеральных удобрений, запасы $N-NO_3$, сформированные за вегетацию зерновых культур, не лимитировали их урожайность. Следовательно, эти данные подтвердили, что при таком применении удобрений одинарная доза NPK и ее сочетание с навозом КРС была более окупаемой, чем двойная доза. При использовании удобрений чаще всего недостаток влаги в критические периоды вегетации ограничивал величину урожая зерновых культур. Более короткий период вегетации однолетних трав, убираемых на сено, способствовал активному использованию влаги и элементов питания.

В работах [3, 4, 6] было предложено оценивать среднюю продуктивность в 6–8-польных севооборотах на серых лесных почвах Ополя по взаимосвязи с мобильным фондом (МФ) азота, который формируется в ранний период вегетации культур. Он представляет сумму содержаний нитратного и аммонийного азота в жидкой фазе почвы, зависит от мобилизационного пула азота. В первом приближении размеры среднегодового мобилизационного пула азота (S_N) оценивали суммой величины содержания азота минеральных удобрений и половиной величины содержания азота органических (навоз КРС), в том числе и симбиотически связанного азота бобовыми культурами:

Таблица 1. Взаимосвязь запасов N-NO₃, сформированных за вегетацию культур (z, кг/га), с их урожайностью (y, ц/га) в зависимости от систем удобрения

Культура	Годы исследования	Уравнение взаимосвязи для n = 15	Изменение "z", кг/га	R ₂	Роль запасов N-NO ₃ в питании
Однолетние травы, сено	2007–2009, 2014–2016, 2021–2022	$y = 24.3 + 0.153z$	183–302	0.980	Прямая
Яровая пшеница, зерно	2009–2010, 2017, 2022–2023	$y = 25.4 + 0.0883z$ $y = 3.06z - 0.497$ $y = -6.9 + 0.341z - 0.0005z^2$	172–354	0.858 0.880 0.925	Не лимитирующая
Озимая пшеница, зерно	2008, 2015–2016	$y = 5.0z - 0.465$ $y = -0.0011z^2 + 0.628z - 18.5$	136–306	0.898 0.985	
Овес, зерно	2016–2018	$y = 3.0z - 0.540$ $y = -0.0013z^2 + 0.614z - 15.7$	113–235	0.887 0.934	
Яровая пшеница по пласту трав, зерно	2019–2021	$y = 5.2z - 0.359$ $y = -0.0007z^2 + 0.389z - 14.0$	164–295	0.825 0.952	
Ячмень по обор. пласта, зерно	2020–2022*	$y = 24.1 + 0.0493z$ $y = -0.0004z^2 + 0.252z - 0.30$	161–352	0.727 0.843	
	2013–2015	$y = 15.6 + 0.161z$ $y = -0.0015z^2 + 0.745z - 38.2$	143–236	0.897 0.936	

* 2021 и 2022 г. были острозасушливыми.

$$S_N = D_{Nm} + 1/2D_{No} + 1/2V_{Nb}, \quad (1)$$

где D_{Nm} – среднегодовая доза азота минеральных удобрений, кг/га; D_{No} – среднегодовая доза азота органических удобрений, кг/га; V_{Nb} – среднегодовые размеры запасов азота, симбиотически связанного бобовыми культурами за севооборот, кг/га.

Для серых лесных почв Ополя в 6–8-польных севооборотах между МФ азота, определяющим среднегодовую их продуктивность, и мобилизационным пулом азота отмечена тесная линейная взаимосвязь. При этом угловой коэффициент возрастания МФ азота от мобилизационного пула был >1.0 , т.е. подвижных форм азота образовывалось больше, чем его вносили с удобрениями. Очевидно, мобилизационный пул азота способствовал дополнительной трансформации азота почвы в его минеральные формы.

В опыте средняя ежегодная составляющая мобилизационного пула азота от доз органических удобрений 40, 60 и 80 т/га за ротацию 7-польного севооборота при содержании азота в навозе 0.45% равна соответственно 12.9, 19.3 и 25.8 кг/га (табл. 2). Основной вклад в величину мобилизационного пула азота на однолетних травах вносил азот аммиачной селитры.

От величины мобилизационного пула азота, очевидно, зависели и экспериментальные запасы N-NO₃ при их формировании за вегетацию "z". 96.8% вариации их запасов было обусловлено изменением

мобилизационного пула азота в зависимости от применения минеральных удобрений и последствий органических (уравнение (2)):

$$U = 185 + 1.17S_N, \quad (2)$$

где $n = 15$, $r^2 = 0.968$, доверительный интервал = 15.5 кг N-NO₃/га. Поэтому рассчитанные по этому уравнению запасы N-NO₃, сформированные за вегетацию (U), можно использовать для оценки величины урожайности культур. Их преимущество состоит в том, что они (величины "U") получены за ряд лет с учетом различных погодных условий. Уравнение (2) является основным для расчета запасов N-NO₃, сформированных за вегетацию однолетних трав, при планируемых уровнях применения навоза КРС за севооборот и внесения азота минеральных удобрений под них.

Размеры выноса азота (N-NO₃) сеном трав необходимо определять по произведению величин рассчитанных за вегетацию запасов N-NO₃ и экспериментального коэффициента их использования. Последний несколько снижался с повышением уровня применения удобрений. Используя экспериментальные данные содержания азота в сене трав и рассчитанный вынос азота сеном, оценивали ожидаемую урожайность сена трав. Экспериментальные

Таблица 2. Взаимосвязь мобилизационного пула азота (S_N , кг/га) со среднегодовыми за 8 опыто-лет запасами нитратного азота (Z , кг/га), сформированными за вегетацию однолетних трав (2007–2009, 2014–2016, 2021–2022 гг.)

Вариант	S_N	Z	Рассчитанные запасы N-NO ₃ за вегетацию (Y , кг/га)	КИ N-NO ₃ от Z^*	Рассчитанный вынос N сеном трав, кг/га	Среднее содержание N в сене трав, %	Урожайность сена трав, ц/га	
							экспериментальная	рассчитанная
1. Без азота и навоза	0	183	185	0.489	90.5	1.74	51.4	52.0
2. N60	60	257	255	0.448	114	1.81	63.5	63.0
3. N75	75	287	273	0.432	118	1.86	66.5	63.4
4. Последействие 40 т/га навоза (Нав40)**	12.9	202	200	0.471	94.2	1.75	54.5	53.8
5. Последействие Нав60	19.3	202	208	0.495	103	1.82	55.0	56.6
6. Последействие Нав80	25.8	205	215	0.498	107	1.80	56.5	59.4
7. Последействие Нав40 и P40K40	12.9	201	200	0.494	98.8	1.78	55.8	55.5
8. Последействие Нав40 + N60	72.9	264	270	0.462	125	1.88	65.0	66.5
9. Последействие Нав40 + N75	87.9	293	288	0.447	129	1.93	68.0	66.8
10. Последействие Нав60 и P40K40	19.3	217	208	0.470	97.8	1.80	56.8	54.3
11. Последействие Нав60 + N60	79.3	274	278	0.452	126	1.88	66.0	67.0
12. Последействие Нав60 + N75	94.3	300	295	0.437	129	1.85	70.8	69.7
13. Последействие Нав80 и P40K40	25.8	221	215	0.462	99.3	1.76	58.0	56.4
14. Последействие Нав80 + N60	85.8	271	285	0.465	132	1.86	67.8	71.0
15. Последействие Нав80 + N75	101	302	303	0.440	133	1.89	70.2	70.4

* КИ – коэффициент использования.

** Нав – навоз. То же в табл. 3, 4.

и рассчитанные величины урожайности трав оказались весьма близкими.

В табл. 3 и 4 представлены данные взаимосвязи мобильного пула азота S_N со средними экспериментальными запасами нитратного азота, формируемыми за вегетацию яровой пшеницы и за период от отрастания до уборки озимой пшеницы, их интерпретация и прогноз влияния удобрений на вынос азота зерном и соломой, урожайность зерна культур, сравнение прогнозируемых параметров с экспериментальными. Возделываемые культуры высевали после занятого пара.

Рассчитанные по величине мобилизационного пула азота запасы N-NO₃ за указанные периоды вегетации культур изменялись в зависимости

от следующих взаимосвязей (уравнение (3) для яровой пшеницы, уравнение (4) для озимой):

$$Y = 187 + 1.44S_N, \quad (3)$$

$n = 15, r^2 = 0.963$, доверительный интервал = 20.0 кг N-NO₃/га;

$$Y = 139 + 1.61S_N, \quad (4)$$

$n = 15, r^2 = 0.981$, доверительный интервал = 16.0 кг N-NO₃/га.

Без внесения азотных минеральных удобрений и навоза рассчитанные запасы N-NO₃ за вегетацию яровой пшеницы составили 187 кг/га, для озимой пшеницы от отрастания до уборки – 139 кг/га, что

Таблица 3. Взаимосвязь мобилизационного пула азота S_N со средними за 5 лет запасами нитратного азота (Z , кг/га), формируемыми за вегетацию яровой пшеницы (2009–2010, 2017, 2022–2023 гг.)

Вариант	S_N , кг/га	Z , кг/га	Рассчи- танные запасы N-NO ₃ за вегета- цию (Y , кг/га)	Средний КИ N-NO ₃ на вы- нос зерном и соло- мой	Вынос N зер- ном и соломой, кг/га		Вынос N 10 ц зер- на с уче- том его выноса соломой, кг	Урожайность зерна яровой пшеницы, ц/га	
					экс- пе- ри- мен- таль- ный	рассчи- танный		экс- пе- ри- мен- таль- ная	рассчи- танная
1. Без N и навоза	0	172	187	62.2	107	116	29.1	36.8	39.9
2. N40P40K40	40	258	245	62.4	161	153	33.7	47.5	45.4
3. N80P80K80	80	297	302	62.0	184	187	36.0	50.2	52.0
4. Навоз 40 т/га (Нав40)	12.9	217	206	61.8	134	127	31.0	43.3	41.1
5. Нав60	19.3	218	215	64.7	141	139	31.3	45.1	44.4
6. Нав80	25.8	234	224	62.4	146	140	32.3	45.2	43.3
7. Нав40 + P40K40	12.9	202	206	65.8	133	135	30.4	43.7	44.5
8. Нав40 + N40P40K40	52.9	248	262	67.3	167	177	33.3	49.5	53.2
9. Нав40 + N80P80K80	92.9	312	321	64.1	200	206	38.0	52.6	54.1
10. Нав60 + P40K40	19.3	216	215	66.2	143	142	31.7	44.8	44.8
11. Нав60+ N40P40K40	59.3	264	272	67.8	179	185	34.6	51.4	53.4
12. Нав60+ N80P80K80	99.3	326	330	62.0	202	205	37.5	53.8	54.6
13. Нав80 + P40K40	25.8	226	224	67.7	153	152	31.7	48.2	47.9
14. Нав80+ N40P40K40	65.8	290	282	65.5	190	185	36.0	52.7	51.3
15. Нав80 + N80P80K80	106	354	340	59.9	212	203	38.6	54.6	52.7

Таблица 4. Взаимосвязь мобилизационного пула азота S_N со средними за 3 года запасами нитратного азота (Z , кг/га), сформированных в период от отрастания озимой пшеницы до уборки (2008, 2015–2016 гг.)

Вариант	S_N , кг/га	Z , кг/га	Рассчи- танные запасы N-NO ₃ за ве-ге- тацию (Y , кг/га)	КИ N-NO ₃ на вы- нос зерном и соло- мой	Вынос N зер- ном и соломой, кг/га		Вынос N 10 ц зер- на с уче- том его выноса соломой, кг	Урожайность зерна озимой пшеницы, ц/га	
					экс- пе- ри- мен- таль- ный	рассчи- танный		экс- пе- ри- мен- таль- ная	рассчи- танная
1. Без N и навоза	0	136	139	64.0	87.0	89.0	19.7	44.2	45.2
2. N40P40K40	40	206	203	68.4	141	139	22.2	63.5	62.6
3. N80P80K80	80	263	267	66.2	174	177	25.8	67.4	68.6
4. Навоз 40 т/га (Нав40)	12.9	156	160	65.4	102	105	19.2	53.0	54.7
5. Нав60	19.3	165	170	66.1	109	112	20.0	55.2	56.0
6. Нав80	25.8	171	180	64.3	110	116	20.2	54.6	57.4
7. Нав40 + P40K40	12.9	159	160	64.2	102	103	19.2	53.2	53.6

Таблица 4. Окончание

Вариант	S_N , кг/га	Z , кг/га	Рассчи- танные запасы N-NO ₃ за ве-ге- тацию (Y , кг/га)	КИ N-NO ₃ на вы- нос зерном и соло- мой	Вынос N зер- ном и соломой, кг/га		Вынос N 10 ц зер- на с уче- том его выноса соломой, кг	Урожайность зерна озимой пшеницы, ц/га	
					экс- пери- мен- таль- ный	рассчи- танный		экспе- римен- таль- ная	рассчи- танная
8. Нав40 + N40P40K40	52.9	236	224	68.6	162	154	24.7	65.6	62.3
9. Нав40 + N80P80K80	92.9	284	288	64.4	183	186	27.3	67.0	68.1
10. Нав60 + P40K40	19.3	171	170	65.5	112	111	20.1	55.8	55.2
11. Нав60+ N40P40K40	59.3	253	234	66.0	167	154	25.0	66.7	61.6
12. Нав60+ N80P80K80	99.3	289	298	65.0	188	194	27.8	67.5	69.8
13. Нав80 + P40K40	25.8	180	180	66.7	120	120	21.3	56.4	56.3
14. Нав80 + N40P40K40	65.8	252	244	65.5	165	160	24.5	67.3	65.3
15. Нав80 + N80P80K80	106	306	309	62.1	190	192	28.1	67.6	68.3

обеспечивало получение урожайности зерна 1-й культуры – 36.8–39.9 ц/га, 2-й культуры – 43–44 ц/га, вынос зерном и соломой соответственно – 107–116 и 87–89 кг азота/га.

При применении азотных минеральных удобрений и навоза КРС увеличение размеров формирования запасов N-NO₃ за весенне-летний период вегетации культур превышало среднюю величину мобилизационного пула азота в 1.44–1.61 раза (уравнения (3) и (4)).

Данные табл. 3 свидетельствовали, что вынос азота 10 ц зерна яровой пшеницы с учетом соответствующего выноса соломой варьировал от 29.1 до 38.6 кг. Он повышался с увеличением уровня применения удобрений, менялся в пределах, приведенных в справочных данных [11]. Для озимой пшеницы за годы исследования (2008, 2015–2016) этот параметр варьировал от 19.2 до 28.1 кг N/10 ц зерна. Его величина без применения азотных минеральных удобрений (19.2–21.3 кг/10 ц зерна) была меньше справочных величин (25–35 кг/10 ц зерна) [11]. С ростом доз азотных удобрений вынос азота 10 ц зерна и соответствующим количеством соломы возрастал до 22.2–28.1 кг. При применении органо-минеральных систем удобрения он был более высоким по сравнению с минеральной. В 2008, 2015–2016 гг. величина гидротермического коэффициента по Селянину (ГТК) составляла соответственно 1.92, 1.34

и 1.28, что вело к росту урожайности зерна озимой пшеницы и снижению в нем содержания азота.

В табл. 5 представлены данные взаимосвязи мобилизационного пула азота S_N со средними за 3 года запасами N-NO₃, сформированными за вегетацию овса, экспериментальные и рассчитанные данные выноса азота зерном и соломой овса, его урожайности.

Для овса, идущего 2-й культурой после занятого пара, а в вариантах применения навоза КРС – при его последствии, рост рассчитанных запасов N-NO₃ за вегетацию соответствовал увеличению мобилизационного пула азота. Об этом свидетельствовал близкий к единице угловой коэффициент при S_N (уравнение (5)):

$$Y = 122 + 1.01S_N, \quad (5)$$

$n = 15$, $r^2 = 0.970$, доверительный интервал = 13 кг N-NO₃/га.

В вариантах без применения азота минеральных удобрений и навоза КРС запасы N-NO₃, сформированные за вегетацию овса, менялись от 113 до 122 кг/га. Они обеспечивали вынос азота зерном и соломой овса 77.9–84.4 кг/га и его урожайность 37.9–41.0 ц/га. По экспериментальным данным, применение двойной дозы NPK по сравнению с одинарной (N40P40K40) не вело к достоверному росту урожайности овса ($HCP_{05} = 3.1$ ц/га). Близкие

Таблица 5. Взаимосвязь мобилизационного пула азота S_N со средними за 3 года запасами нитратного азота (Z , кг/га), сформированными за вегетацию овса (2016–2018 гг.)

Вариант	S_N , кг/га	Z , кг/га	Рассчи- танные запасы N-NO ₃ за вегета- цию (Y , кг/га)	КИ N-NO ₃ на вы- нос зерном	Вынос N зер- ном и соломой, кг/га		Вы- нос N 10 ц зерна с учетом его вы- носа со- ломой, кг	Урожайность зерна овса, ц/га	
					экспе- римен- таль- ный	рас- счи- тан- ный		экс- пери- мен- таль- ная	рас- счи- тан- ная
1. Без N и навоза	0	113	122	69.2	77.9	84.4	20.6	37.9	41.0
2. N40P40K40	40	158	162	68.5	108	111	21.3	50.6	52.1
3. N80P80K80	80	202	203	66.9	135	136	26.1	51.8	52.1
4. Навоз 40 т/га (Нав40)	12.9	134	135	65.7	87.6	88.7	21.7	40.4	40.9
5. Н ав 60	19.3	140	142	68.0	93.9	96.6	21.8	43.0	44.3
6. Нав80	25.8	161	148	63.8	103	94.4	22.5	45.6	42.0
7. Нав40 + P40K40	12.9	131	135	66.9	87.0	90.3	21.2	41.0	42.6
8. Нав40 + N40P40K40	52.9	177	175	69.1	122	121	23.4	52.2	51.7
9. Нав40 + N80P80K80	92.9	210	216	65.9	138	142	25.4	54.4	55.9
10. Нав60 + P40K40	19.3	141	142	67.6	95.1	96.0	21.2	44.8	44.8
11. Нав60+ N40P40K40	59.3	182	182	69.3	125	126	24.1	51.9	52.3
12. Нав60+ N80P80K80	99.3	215	222	67.6	145	150	27.0	53.6	55.6
13. Нав80 + P40K40	25.8	158	148	68.2	107	101	22.1	48.4	45.7
14. Нав80+ N40P40K40	65.8	193	188	67.2	128	126	24.0	53.4	52.5
15. Нав80+ N80P80K80	106	235	229	63.6	149	146	27.3	54.5	53.5

результаты в основном наблюдали и в соответствующих вариантах для рассчитанных запасов N-NO₃. Величины HCP_{05} и форма квадратичных уравнений (табл. 1) подтверждали представление о том, что запасы N-NO₃, сформированные за вегетацию, в удобренных азотом вариантах не лимитировали урожайность культуры. Применение одинарной дозы N40P40K40 являлось оптимальной дозой под овес.

Вынос азота 10 ц/га зерна и соответствующего количества соломы варьировал от 20.6 до 27.3 кг. На серых лесных почвах он был меньше справочных данных (27–33 кг/10 ц зерна) [11].

И для 6-й (табл. 6), и 7-й (табл. 7) культур 7-польного севооборота в 4-й ротации установлены близкие величины экспериментальных и рассчитанных параметров по предложенной методике. При этом следует обратить внимание на то, что на серых лесных почвах Ополя в вариантах без применения навоза КРС и азота минеральных удобрений за вегетацию зерновых культур формировались близкие запасы нитратного азота Z (164 и 161 кг/га).

Это подтверждено и соответствующими величинами свободного члена (171 и 158) уравнений взаимосвязи мобилизационного пула азота (S_N)

с экспериментальными размерами запаса N-NO₃, сформированными за вегетацию культур. Уравнение (6) получено для яровой пшеницы (2019–2021 гг.), уравнение (7) – для ячменя (2020–2022 гг.):

$$Y = 171 + 1.15S_N, \quad (6)$$

$n = 15$, $r^2 = 0.954$, доверительный интервал = 18 кг N-NO₃/га;

$$Y = 158 + 1.65S_N, \quad (7)$$

$n = 15$, $r^2 = 0.947$, доверительный интервал = 28 кг N-NO₃/га.

Однако угловой коэффициент при S_N для яровой пшеницы (1.15) был в 1.43 раза более низким, чем для ячменя (1.65). Это связано в основном с различиями погодных условий. При возделывании яровой пшеницы ГТК в 2019 г. составлял 1.33, в 2020 г. – 1.31 и в 2021 засушливом году – 1.04, в среднем за 3 года – 1.23. При возделывании ячменя 2020 г. был увлажненным (ГТК = 1.31), а 2021 г. – засушливым (ГТК = 1.04), 2021 г. – острозасушливым (ГТК = 0.54), в среднем за 3 года величина ГТК составила 0.96. Выпадение осадков за вегетационный период

Таблица 6. Взаимосвязь мобилизационного пула азота S_N со средними за 3 года запасами нитратного азота (Z , кг/га), сформированными за вегетацию яровой пшеницы, идущей после пласта трав 2-го года пользования (2019–2021 гг.)

Вариант	S_N , кг/га	Z , кг/га	Рассчитан- ные запасы N-NO ₃ за вегета- цию ($У$, кг/га)	КИ N-NO ₃ на вы- нос зерном и соло- мой	Вынос N зер- ном и соло- мой, кг/га		Вынос N 10 ц зер- на с уче- том его выноса соломой, кг	Урожайность зерна яровой пшеницы, ц/га	
					экс- пери- мен- таль- ный	рас- счи- тан- ный		экспери- менталь- ная	рассчи- танная
1. Без N и навоза	0	164	171	54.6	90.0	93.4	29.4	30.6	31.8
2. N40P40K40	40	219	217	53.8	115	117	31.2	36.8	37.5
3. N80P80K80	80	283	263	48.2	130	127	33.3	39.0	38.1
4. Навоз 40 т/га (Нав40)	12.9	184	186	54.1	101	101	30.6	33.0	33.0
5. Нав60	19.3	196	193	54.8	107	106	30.9	34.6	34.3
6. Нав80	25.8	208	200	51.9	108	104	31.0	34.8	33.5
7. Нав40 + P40K40	12.9	191	186	53.4	102	99.3	29.0	35.2	34.2
8. Нав40 + N40P40K40	52.9	222	232	55.1	122	128	32.4	37.6	39.5
9. Нав40 + N80P80K80	92.9	281	277	49.1	133	136	35.0	38.0	38.9
10. Нав60 + P40K40	19.3	201	193	55.8	112	108	31.5	35.6	34.3
11. Нав60 + N40P40K40	59.3	231	239	54.7	127	131	33.2	38.2	39.4
12. Нав60 + N80P80K80	99.3	277	285	50.6	139	144	35.6	39.1	40.4
13. Нав80 + P40K40	25.8	195	200	56.4	109	113	31.3	34.8	36.1
14. Нав80 + N40P40K40	65.8	233	246	54.9	128	135	33.7	38.0	40.0
15. Нав80 + N80P80K80	106	295	292	48.0	136	140	34.9	39.0	39.0

Таблица 7. Взаимосвязь мобилизационного пула азота S_N со средними за 3 года (2020–2022 гг.) запасами нитратного азота (Z , кг/га), сформированными за вегетацию ячменя, идущего после оборота пласта трав 2-го года пользования

Вариант	S_N , кг/га	Z , кг/га	Рассчи- танные запасы N-NO ₃ за вегета- цию ($У$, кг/га)	КИ N-NO ₃ на вы- нос зерном и соло- мой	Вынос N зерном и соломой, кг/га		Вынос N 10 ц зер- на с уче- том его выноса соломой, кг	Урожайность зер- на ячменя, ц/га	
					экс- пери- мен- таль- ный	рас- счи- тан- ный		экс- пери- мен- таль- ная	рас- счи- танная
1. Без N и навоза	0	161	158	52.3	84.8	82.6	30.4	27.9	27.2
2. N40P40K40	40	237	224	49.9	117	112	32.0	36.5	35.0
3. N80P80K80	80	313	290	43.8	132	127	35.2	37.5	36.1

Таблица 7. Окончание.

Вариант	S_N , кг/га	Z , кг/га	Рассчи- танные запасы N-NO ₃ за вегета- цию (U , кг/га)	КИ N-NO ₃ на вы- нос зерном и соло- мой	Вынос N зерном и соломой, кг/га		Вынос N 10 ц зер- на с уче- том его выноса соломой, кг	Урожайность зер- на ячменя, ц/га	
					экспе- римен- тальный	рассчи- танный		экспе- римен- тальная	рассчи- танная
4. Навоз 40 т/га (Нав40)	12.9	190	180	53.4	97.7	96.1	29.9	32.7	32.1
5. Нав60	19.3	184	190	56.4	103	107	30.8	33.4	34.7
6. Нав80	25.8	195	201	56.3	110	113	31.9	34.5	35.4
7. Нав40 + P40K40	12.9	175	180	57.3	100	103	29.1	33.0	35.4
8. Нав40 + N40P40K40	52.9	232	246	52.7	123	130	33.5	36.7	38.8
9. Нав40 + N80P80K80	92.9	310	312	44.2	137	138	36.7	37.3	37.6
10. Нав60 + P40K40	19.3	205	190	51.7	104	98.2	31.0	33.5	31.7
11. Нав60 + N40P40K40	59.3	250	256	51.2	128	131	32.6	39.3	40.2
12. Нав60 + N80P80K80	99.3	309	322	47.2	146	152	36.3	40.2	41.9
13. Нав80 + P40K40	25.8	198	201	55.3	109	111	31.5	34.6	35.2
14. Нав80 + N40P40K40	65.8	240	267	51.5	125	137	32.7	38.2	41.9
15. Нав80 + N80P80K80	106	352	333	44.3	148	148	36.3	40.8	40.8

в 2019–2021 гг. при возделывании яровой пшеницы составляло 294–306 мм (в среднем 300 мм), ячменя за 2020, 2021 и 2022 гг. – соответственно 306, 299 и 156 мм (в среднем 254 мм) [5].

Следовательно, более засушливые условия при возделывании ячменя в 2020–2022 гг., чем яровой пшеницы за 2019–2021 гг., способствовали росту углового коэффициента при S_N (мобилизационном пуле), обеспечению более высоких запасов N-NO₃, сформированных за вегетацию. Это означает, что в более засушливых условиях мобилизационный пул азота повышал трансформацию азота почвы в его минеральные формы. Подтверждением этого были результаты исследования по формированию запаса N-NO₃ в почве под ячменем в 3-й ротации 7-польного севооборота в 2013–2015 гг. (табл. 8).

В 2013–2015 гг. за вегетационный период ячменя выпадало от 285 до 431 мм осадков, а ГТК по Селянинову изменялся от 1.22 до 1.74 [5], сумма температур >10°C – от 2275 до 2400°C. В 2020–2022 гг. последняя варьировала от 2140 до 2440°C. В более благоприятных условиях увлажнения почвы под

ячменем в 3-й ротации в вариантах без внесения азотных минеральных удобрений и навоза КРС наблюдали тенденцию к снижению запасов N-NO₃, сформированных за вегетацию ячменя (со 158–161 в 4-й ротации до 143–145 кг/га в 3-й). При этом трансформация почвенного азота заметно замедлялась. Об этом свидетельствовало снижение углового коэффициента при « S_N » уравнения его взаимосвязи с запасами N-NO₃, сформированными за вегетацию ячменя (уравнение (8)):

$$U = 145 + 0.874S_N, \quad (8)$$

$n = 15$, $r^2 = 0.964$, доверительный интервал = 12 кг N-NO₃/га.

Погодные условия в 3-й ротации севооборота по сравнению с 4-й хотя и способствовали росту урожайности зерна ячменя с 27.9–40.8 до 36.1–52.5 ц/га, но при этом в нем снижалось содержание азота и уменьшался его вынос 10 ц зерна с учетом выноса с соломой с 29.9–36.7 (табл. 7) до 23.2–28.9 кг (табл. 8). В более засушливых условиях этот параметр был больше справочных показателей (25–30 кг/10 ц) [11].

Таблица 8. Взаимосвязь мобилизационного пула азота S_N со средними за 3 года (2013–2015 гг.) запасами нитратного азота (Z , кг/га), сформированными за вегетацию ячменя, идущего после оборота пласта трав 2-го года пользования

Вариант	S_N , кг/га	Z , кг/га	Расчи- танные запасы N-NO ₃ за вегета- цию ($У$, кг/га)	КИ N-NO ₃ на вы- нос зерном и соло- мой	Вынос N зер- ном и соломой, кг/га		Вынос N 10 ц зер- на с уче- том его выноса соломой, кг	Урожайность зерна ячменя, ц/га	
					экспе- римен- таль- ный	рас- счи- тан- ный		экспе- римен- тальная	рас- счи- тан- ная
1. Без N и навоза	0	143	145	60.2	86.1	87.3	23.8	36.1	36.7
2. N40P40K40	40	188	180	65.4	123	118	25.1	49.0	47.0
3. N80P80K80	80	219	215	64.4	141	138	27.4	51.4	50.4
4. Навоз 40 т/га (Нав40)	12.9	159	156	58.7	93.4	91.6	24.0	38.9	38.2
5. Нав60	19.3	156	162	62.0	96.7	100	23.5	41.1	42.6
6. Нав80	25.8	164	167	60.8	99.7	102	24.5	40.7	41.6
7. Нав40 + P40K40	12.9	151	156	63.8	96.3	99.5	23.2	41.5	42.9
8. Нав40 + N40P40K40	52.9	188	191	64.9	122	124	25.4	48.0	48.8
9. Нав40 + N80P80K80	92.9	224	226	65.2	146	147	27.8	52.5	52.9
10. Нав60 + P40K40	19.3	168	162	60.7	102	98.3	23.4	43.5	42.0
11. Нав60 + N40P40K40	59.3	210	197	62.9	132	124	27.3	48.4	45.4
12. Нав60 + N80P80K80	99.3	224	232	65.2	146	151	28.6	51.1	52.8
13. Нав80 + P40K40	25.8	162	167	63.0	102	105	24.1	42.4	43.6
14. Нав80 + N40P40K40	65.8	203	202	60.1	122	121	25.1	48.6	48.2
15. Нав80 + N80P80K80	106	236	237	62.7	148	149	28.9	51.2	51.6

Влияние погодных условий на интенсивность процессов трансформации почвенного азота под влиянием мобилизационного пула азота S_N оценивали по взаимосвязи величин ГТК по Селянинову и углового коэффициента при S_N и максимальными размерами запасов N-NO₃, сформированными за вегетацию яровых зерновых культур и однолетних трав (табл. 9). Чем больше был угловой коэффициент при S_N , тем больше была интенсивность процессов минерализации и трансформации почвенного азота.

Между величинами ГТК и углового коэффициента ν при S_N (уравнения (2, 3), (5–8)) наблюдали достоверную обратную линейную связь (уравнение (9)):

$$\nu = 3.36 - 1.75 \text{ ГТК}, \quad (9)$$

$$n = 6, r^2 = 0.887, \text{ доверительный интервал} = 0.21.$$

Обратную линейную (но не достоверную) взаимосвязь при 5%-ном уровне значимости ($r^2 = 0.648$)

выявили между величиной ГТК и максимальными размерами запасов N-NO₃, сформированных за вегетацию культур (экспериментальная величина коэффициента Фишера 7.38 была меньше теоретической – 7.71).

Из данных табл. 9 видно, что при более высоких величинах ГТК (1.29 и 1.43) максимальные экспериментальные запасы N-NO₃, сформированные за вегетацию культуры, были наименьшими. Это свидетельствовало о том, что в увлажненные годы на серых лесных почвах Ополя при применении полного минерального удобрения в дозе N40P40K40 подкормки яровых культур, особенно яровой пшеницы, в фазе выхода в трубку должны заметно повышать урожайность зерна и содержание в нем азота.

Показано, что рассчитанные по величине мобилизационного пула азота по предложенным уравнениям запасы N-NO₃, сформированные за ротацию за ряд лет, можно использовать для прогнозирования урожайности культур. Для этого по данным зональных

Таблица 9. Взаимосвязь величин гидротермического коэффициента по Селянинову (ГТК), углового коэффициента при S_N и максимальными размерами запасов $N-NO_3$, сформированных за вегетацию яровых зерновых культур и однолетних трав

Культура	Годы исследования	Средний ГТК	Угловой коэффициент при S_N		Z максимальные, кг/га	
			экспериментальный	рассчитанный	экспериментальные	рассчитанные
Однолетние травы – занятый пар	2007–2009, 2014–2016, 2021–2022	1.24	1.17	1.20	302	292
Яровая пшеница	2009–2010, 2017, 2022–2023	1.20	1.44	1.26	354	303
Овес	2016–2018	1.29	1.01	1.10	235	278
Яровая пшеница после пласта многолетних трав	2019–2021	1.23	1.15	1.21	295	295
Ячмень после оборота пласта	2020–2022	0.96	1.65	1.68	352	369
Ячмень после оборота пласта	2013–2015	1.43	0.874	0.858	236	239

научно-исследовательских учреждений должны быть установлены размеры формирования запаса $N-NO_3$ за вегетацию, коэффициенты использования их на вынос азота зерном и соломой, размеры выноса азота 10 ц зерна и соответствующего количества соломы (можно использовать и справочные данные выноса азота зерном и соломой). Мобилизационный пул азота для примененной системы удобрения должен рассчитываться непосредственно пользователем. Им же по соответствующим уравнениям для каждой культуры по величине мобилизационного пула азота определяются средние запасы $N-NO_3$, сформированные за вегетацию, в зависимости от уровня применения удобрений. По полученным величинам и коэффициенту использования $N-NO_3$ на вынос азота зерном и соломой рассчитывают урожайность культуры.

По прогнозируемой урожайности полевых культур рассчитывают дозы применения фосфорно-калийных удобрений [12]. На серых лесных почвах Ополя в работах [4, 5] при применении органоминеральных систем удобрения в 7-польном севообороте применение минеральных удобрений с соотношением в них $N : P : K = 1 : 1 : 1$ является наиболее оптимальным. Под зерновые культуры наиболее окупаема одинарная доза полного минерального удобрения $N40P40K40$, под однолетние травы – $N60-75$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в многолетнем стационарном опыте на серых лесных почвах Верхневолжья

установлена возможность оценки урожайности основной продукции зерновых культур и однолетних трав, используя взаимосвязь мобилизационного пула азота с запасами $N-NO_3$, сформированными за вегетацию культур. Оценка выполняется по данным, полученным за несколько лет, что позволяет полнее учесть влияние на нее различий погодных условий. С повышением засушливости вегетационных периодов при возделывании яровых зерновых культур и однолетних трав возрастает роль мобилизационного пула азота в трансформации почвенного азота в его нитратные формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Окорков В.В., Григорьев А.А., Аркадьева М.Ф. Влияние систем удобрения на продуктивность севооборота и плодородие серой лесной почвы Владимирского ополя // Агрохимия. 1997. № 5. С. 55–65.
2. Окорков В.В. Удобрения и плодородие серых лесных почв Владимирского ополя. Владимир: ВОО ВОИ, 2006. 356 с.
3. Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А. Приемы комплексного использования средств химизации в севообороте на серых лесных почвах Верхневолжья в агротехнологиях различной интенсивности. Суздаль: Владимирский НИИСХ, 2017. 176 с.
4. Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А. Серые лесные почвы Владимирского ополя и эффективность использования их ресурсного потенциала. Иваново: ПресСто, 2021. 188 с.

5. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Коновалова Л.К.* Серые лесные почвы Владимирского ополья, их формирование и оценка ресурсного потенциала: удобрение и питание полевых культур. Суздаль—Воронеж: Минобрнауки РФ, Верхневолжский ФАНЦ, 2023. 241 с.
6. *Окорков В.В.* Модели продуктивности зернового севооборота на серых лесных почвах Верхневолжья // Рос. сел.-хоз. наука. 2018. № 1. С. 30–34.
7. *Окорков В.В.* Удобрение и питание полевых культур азотом на серых лесных почвах Верхневолжья // Агрохимическая наука — синтез академических знаний и практического опыта: Мат-лы Всерос. конф., МГУ им. М.В. Ломоносова. М.: Постер-М, 2023. С. 125–126.
8. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Лебедева А.Е.* Питание однолетних трав азотом на серых лесных почвах Владимирского ополья // Владимир. земледелец. 2024. № 1(107). С. 31–38.
9. *Шукин И.М., Окорков В.В., Окоркова Л.А., Лебедева А.Е., Шукина В.И.* Влияние удобрений и погодных условий на урожайность ячменя и содержание подвижных форм азота на серых лесных почвах Ополья // Владимир. земледелец. 2024. № 1(107). С. 47–56.
10. Практикум по агрохимии / Под ред. Б.А. Ягодина. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
11. Системы земледелия / Под ред. А.Ф. Сафонова. М.: КолосС, 2009. 447 с.
12. Научные основы систем земледелия Владимирской области / Под ред. Бирюкова И.В., Зинченко С.И. Владимир: ВОО ВОИ ПУ “Рост”, 2009. 308 с.

Methods for Optimizing Fertilizer Doses on Gray Forest Soils of the Vladimir Opole

V. V. Okorkov[#]

*Verkhnevolzhsky Federal Agrarian Scientific Center,
Tsentralnaya ul. 3, Suzdalsky district, Vladimir region, Novy 601261, Russia*

[#]*E-mail: okorkovvv@yandex.ru*

The influence of mineral and organomineral (NPK + cattle manure) fertilizer systems in crop rotation on the yield of grain crops and annual grasses has been studied in a long-term stationary experiment on gray forest soils of the Vladimir Opole. It was found that it was 84.3–98.5% dependent on N-NO₃ reserves formed during the growing season of crops. These reserves, with the combined use of cattle manure up to 80 t/ha for rotation of crop rotation and one-time N80 as part of NPK for culture, did not limit its yield. It is proposed to predict the yield of grain and hay of cultivated crops based on the relationship of the nitrogen mobilization pool with N-NO₃ reserves formed during the growing season of spring crops and from regrowth to harvesting of winter crops, and their utilization coefficients for nitrogen removal by grain and straw. The size of the formation of N-NO₃ reserves during the growing season and the coefficients of their use for takeaway products are estimated by zonal research institutions; the mobilization pool of nitrogen is calculated from the adopted fertilizer system. Data on nitrogen removal from products can be used from reference literature, more correctly from research data from research institutions. For grain crops and annual grasses of the 7-field crop rotation, a good agreement of the experimental yield with the calculated one was obtained. It has been reliably established that with an increase in the aridity of the growing seasons during the cultivation of spring cereals and annual grasses, the role of the nitrogen mobilization pool in the transformation of soil nitrogen into its mobile forms increases. It is shown that on gray forest soils of the Upper Volga region, when using organomineral fertilizer systems in a 7-field crop rotation, a single dose of N40P40K40 is optimal for the cultivation of grain crops, N60–75 – for the cultivation of annual legume-cereal grasses.

Keywords: gray forest soils, Vladimir Opole, formation of N-NO₃ reserves during vegetation, nitrogen mobilization pool, cereals, annual grasses, hydrothermal coefficient.