

УДК 631.416:631.445.25:631.51(470.314)

УДОБРЕНИЕ ОДНОЛЕТНИХ ТРАВ НА СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ ВЛАДИМИРСКОГО ОПОЛЯ

© 2023 г. В. В. Окорков^{1,*}, Л. А. Окоркова¹, А. Е. Лебедева¹¹Верхневолжский федеральный аграрный научный центр
601261 Владимирская обл., Суздальский р-н, пос. Новый, Россия

*E-mail: okorkovvv@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.03.2023 г.

После доработки 28.04.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

В многолетнем стационарном опыте изучены влияние удобрений на урожайность однолетних трав (викоовсяной и горохоовсяной смесей) и нитрифицирующая активность серых лесных почв. За 8 лет как без применения удобрений, так и с ними, урожайность трав изменялась в 1.72–1.88 раза. Установлено, что применение азота минеральных удобрений обеспечивало 88.3% общей вариации их урожайности, последствие навоза – 8.1, последствие РК удобрений – 1.8%. За 7 лет из 8-ми выявлена высокая степень взаимосвязи урожайности трав с запасами N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в фазе всходов трав. При этом минимальные запасы N-NO₃ формировались при гидротермическом коэффициенте за вегетационный период, равном 1.21. Применение удобрений, повышение увлажненности и температур в течение вегетации трав вели к росту нитрификационной активности серой лесной почвы. Предложено оценивать участие подвижных форм азота в питании растений по отношению содержания N-NO₃ в почве к содержанию N-NH₄ в водной вытяжке (1 : 1). Величины этого параметра в фазах всходов и уборки трав подтвердили определяющую роль запасов N-NO₃ в питании однолетних трав. Рассчитаны разностные коэффициенты использования азота N_{aa} в дозах N60 и N75, которые варьировали от 40 до 49%. Предложен алгоритм расчета размеров накопления N-NO₃ за вегетационный период трав. В удобренных азотом вариантах установлено хорошее совпадение коэффициентов использования накапливающихся запасов N-NO₃ с разностными.

Ключевые слова: серые лесные почвы, Владимирское ополье, урожайность, запасы нитратного и аммонийного азота, степень перехода аммонийного азота почвы в жидкую фазу, вынос N травами, отношение содержаний N-NO₃ и N-NH₄ в жидкой фазе почвы.

DOI: 10.31857/S0002188123100113, EDN: GHCXCP

ВВЕДЕНИЕ

Однолетние травы (викоовсяная и горохоовсяная смеси) в Нечерноземной зоне РФ являются важнейшим предшественником озимых и яровых культур, повышают чистоту полей и обеспеченность влагой, улучшают питание зерновых азотом [1]. В то же время нет однозначного мнения об удобрении этих культур. На серых лесных почвах Владимирского ополья в 1-й и 2-й ротациях 8-польного зернотравянопропашного севооборота удобрение однолетних трав полным минеральным удобрением (N40P40K40 и N80P80K80) по сравнению с одними азотными удобрениями слабо повышало их урожайность и заметно снижало их окупаемость [2]. Поэтому в 3-й и 4-й ротациях этого опыта взамен доз NPK применяли лишь дозы N60 и N75 в виде аммиачной селитры. Изучение их эффективности и было одной из целей работы.

Другая цель работы – на серых лесных почвах Ополья оценить роль нитратного и аммонийного азота в питании викоовсяной (горохоовсяной) смеси, т.к. в настоящее время, основываясь на опытах в водных культурах, распространено мнение о равноценности аммонийной и нитратной форм азота в питании растений [3]. Однако следует учитывать, что в почве нитратный азот полностью находится в жидкой фазе (почвенном растворе), а аммонийный – частично. Степень перехода N-NH₄ почвы в ее жидкую фазу зависит от свойств ППК и уровня применения удобрений [4–7].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 7-польном севообороте: занятый пар–яровая пшеница–овес с подсевом многолетних трав (клевер + тимофеев-

Таблица 1. Урожайность викоовсяной (горохоовсяной) смеси за годы исследования, ц з.е./га

Вариант	2007	2008	2009	2014	2015	2016	2021	2022	Среднее
1. Контроль	18.2	24.3	26.1	15.9	19.1	19.0	20.2	15.1	19.7
2. Известкование	19.2	24.2	24.5	16.3	18.7	22.1	19.5	15.9	20.0
3. РК – последствие	18.1	27.5	25.6	17.2	19.6	27.5	23.0	17.3	22.0
4. N60	23.0	32.1	32.5	21.1	24.6	30.6	21.2	18.2	25.4
5. N75	24.1	32.2	36.3	21.1	24.5	31.4	24.1	19.3	26.6
6. Навоз 40 т/га (Нав40) – последствие	19.7	27.2	24.3	17.8	19.0	26.3	21.9	18.1	21.8
7. Нав60 – последствие	18.5	25.0	24.9	18.6	20.7	26.8	23.6	18.2	22.0
8. Нав80 – последствие	19.6	26.8	24.4	18.9	20.3	28.3	23.3	18.9	22.6
9. Нав40 + РК – последствие	19.8	24.1	26.3	17.7	20.1	27.7	24.9	17.6	22.3
10. Нав40 + N60	23.5	31.6	31.7	21.1	24.8	29.4	25.4	20.4	26.0
11. Нав40 + N75	24.9	31.7	35.4	21.4	26.5	32.5	24.7	20.5	27.2
12. Нав60 + РК – последствие	19.7	26.0	26.3	19.9	20.1	25.0	26.1	18.5	22.7
13. Нав60 + N60	23.0	31.3	32.4	21.2	25.4	31.8	26.6	19.8	26.4
14. Нав60 + N75	26.0	36.5	37.2	22.2	25.2	33.0	25.6	20.7	28.3
15. Нав80 + РК – последствие	21.5	27.2	26.2	20.7	20.1	26.6	24.9	18.7	23.2
16. Нав80 + N60	25.4	32.6	33.3	21.7	24.2	33.3	26.2	20.3	27.1
17. Нав80 + N75	25.7	34.0	35.7	21.4	26.8	33.3	26.7	21.5	28.1
<i>HCP</i> ₀₅	2.0	4.2	2.8	1.6	2.0	2.6	3.2	1.1	2.4
Точность опыта, %	3.3	5.1	3.4	2.9	3.2	3.3	4.8	2.0	3.5

Примечание. Нав – навоз. То же в табл. 2–14.

ка) – травы 1-го года пользования–травы 2-го года пользования–яровая пшеница–ячмень на викоовсяной (горохоовсяной) смеси в 3–5-й ротациях. Стационарный опыт был заложен в 1991–1993 гг. в 3-х закладках (полях) [2, 4].

Почва опытных полей – серая лесная среднесуглинистая 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 было проведено известкование по полной гидролитической кислотности. На его фоне изучали влияние различных доз подстилочного навоза КРС (0, 40, 60 и 80 т/га), который вносили после уборки однолетних трав на сено, и влияние ежегодного применения минеральных удобрений (0, РК, NPK, 2NPK), их сочетания на урожайность полевых культур, изменение агрохимических свойств серой лесной почвы. Во 2–5 ротациях вели исследование

последствия известкования. Схема применения удобрений под травы приведена в табл. 1. В качестве минеральных удобрений использовали N_{aa} , которую вносили под предпосевную культувацию.

Агрохимические анализы почвы выполняли по методикам, изложенным в работе [8]. Статистическую обработку результатов проводили с использованием программ STAT VIUA и EXCEL.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 и 2 представлены данные влияния удобрений на урожайность однолетних трав за 8 опыто-лет. В зависимости от погодных условий урожайность трав без применения удобрений изменялась по годам исследования в 1.72 раза, с удобрениями – в 1.88 раза. Результаты исследования свидетельствовали об определяющей роли азотных минеральных удобрений на их урожайность. Получены достоверные прибавки и от последствия навоза КРС, внесенного в дозах 60 и

Таблица 2. Влияние удобрений на среднюю урожайность однолетних трав при последствии известкования за 8 опыто-лет, ц з.е./га (контроль – 19.7 ц з.е./га)

Последствие доз навоза, т/га	Применение минеральных удобрений				Среднее (навоз), $HCP_{05} = 1.2$ ц з.е./га
	0	последствие РК	N60	N75	
0	20.0	22.0	25.4	26.6	23.5
40	21.8	22.3	26.0	27.2	24.3
60	22.0	22.7	26.4	28.3	24.8
80	22.6	23.2	27.1	28.1	25.2
Среднее (минеральные удобрения), $HCP_{05} = 1.2$ ц з.е./га	21.6	22.6	26.2	27.6	

Таблица 3. Математические зависимости влияния удобрений на урожайность однолетних трав (среднее за 8 опыто-лет (Y , ц з.е./га))

Модели взаимосвязи	Уравнение взаимосвязи, $n = 17$	R^2
1	$Y = 20.5 + 0.025x_1 + 0.060x_2 + 0.021x_3$	0.982
2	$Y = 20.8 + 0.0256x_1 + 0.0737x_2$	0.964
3	$Y = 21.8 + 0.0755x_2$	0.883

Примечание. x_1 – последствие доз навоза, т/га, x_2 – действие доз азота NH_4NO_3 , x_3 – последствие РК-удобрений в расчете на P_2O_5 , кг/га.

80 т/га, отсутствие их для последствия РК-удобрений.

Математические зависимости по влиянию удобрений на урожайность однолетних трав в среднем за годы исследования (табл. 3) показали, что применение азота минеральных удобрений обеспечивало 88.3% общей вариации урожайности трав, последствие навоза – 8.1, последствие РК-удобрений – 1.8%.

1 кг азота аммиачной селитры в дозе N60 обеспечивал увеличение урожайности однолетних трав на 9.0 кг з.е., а по последствию навоза в дозах 40, 60 и 80 т/га – соответственно на 10.0, 10.7 и 11.8 кг з.е. Соответствующие показатели при применении N75 составили: 8.8, 9.6, 11.1 и 10.8 кг з.е. Они были близкими для обеих доз азота в форме NH_4NO_3 .

Следовательно, урожайность однолетних трав должна определяться содержанием и запасами в почве подвижных форм азота, т.к. последствие навоза в первую очередь влияло на их изменение.

В табл. 4 представлены данные о запасах $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации однолетних трав. Они резко возрастали при непосредственном применении аммиачной се-

литры. В работе [4] было установлено, что средняя продуктивность 8- и 7-польных севооборотов по степенной или гиперболической зависимостям возрастала с повышением запасов $N-NO_3$ в указанном слое, формирующихся именно в 1-й ранний срок наблюдений.

Проведенное изучение взаимосвязи урожайности однолетних трав с запасами нитратного азота в слое 0–40 см почвы в 1-й срок наблюдений также подтвердило их определяющую роль в повышении продуктивности трав (табл. 5). Очень высокая степень взаимосвязи ($R^2 > 0.80$) между указанными параметрами установлена в 3-й ротации 7-польного севооборота (2007–2009 гг.), когда величина гидротермического коэффициента по Селянинову была >1.05 , а также в 4-й ротации в 2015 г. при ГТК = 1.34. В 2021 г. в отсутствие осадков в критические периоды вегетации трав и близкой их урожайности при внесении азота и последствии навоза и РК-удобрений она была слабой, в остальные годы – на уровне высокой (>0.60 , но <0.80).

Максимальные запасы $N-NO_3$ в фазе всходов культур (Z_{max} , кг/га) зависели от погодных условий. Установлено, что они по квадратичной зави-

Таблица 4. Влияние удобрений на запасы N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в фазе всходов под викоовсяной (горохо-овсяной) смесью в годы исследования, кг/га

Вариант	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее
1. Контроль	60.5	30.9	61.0	52.5	35.8	37.1	64.9	45.9	48.6
2. Известкование	53.1	46.8	43.1	63.6	52.6	37.9	81.8	45.4	53.0
3. Известкование	51.4	38.2	41.6	62.9	46.4	41.1	87.3	44.3	51.6
4. N60	92.8	171	120	119	134	82.2	148	229	137
5. N75	118	249	143	137	153	158	172	241	172
6. Навоз 40 т/га	54.8	32.7	54.3	52.6	43.6	40.1	57.8	54.6	48.8
7. Навоз 60 т/га	50.7	45.1	53.2	59.0	74.2	48.5	77.2	57.4	52.5
8. Навоз 80 т/га	54.3	42.5	47.9	46.1	53.8	42.7	56.5	73.9	52.2
9. Навоз 40 т/га	44.8	28.2	54.4	58.4	78.0	40.4	57.5	79.6	55.2
10. Нав40 + N60	120	191	109	106	134	110	145	207	140
11. Нав40 + N75	144	278	149	157	166	178	177	226	184
12. Нав60	70.1	39.6	62.7	85.8	52.0	38.6	82.4	76.6	63.5
13. Нав60 + N60	116	179	126	156	129	124	165	185	148
14. Нав60 + N75	128	245	191	216	166	166	176	204	186
15. Нав80	64.7	43.5	52.0	88.9	70.4	44.9	94.6	61.3	65.0
16. Нав80 + N60	113	226	118	138	134	129	161	186	151
17. Нав80 + N75	156	264	172	189	177	170	200	257	198
Среднее	87.8	126	94.0	105	100	87.6	118	134	106

Таблица 5. Взаимосвязь урожайности викоовсяной (горохоовсяной) смеси (ц з.е./га) с запасами нитратного азота в слое 0–40 см почвы в фазе всходов (Z, кг/га)

Год исследования	Уравнение взаимосвязи, n = 17	R ²	X = Z, уменьшенным на (кг/га)	Максимальная величина Z	ГТК
2007	$Y = 18.3 + 0.071x$	0.867	40	156	1.05
2008	$Y = 0.0357x + 25.6$	0.844	30	278	1.92
2009	$Y = 25.1 + 0.064x - 0.0001x^2$	0.866			
	$Y = 23.7x^{0.0568}$	0.746			
	$Y = 0.0949x + 24.5$	0.954	40	191	1.09
2014	$Y = 20.6x^{0.1052}$	0.798			
	$Y = 23.8 + 0.137x - 0.0003x^2$	0.969			
	$Y = 17.7 + 0.032x$	0.693	45	216	0.94
2015	$Y = 17.0 + 0.071x - 0.0003x^2$	0.787			
	$Y = 18.6 + 0.057x$	0.948	35	177	1.34
2016	$Y = 25.3 + 0.060x$	0.677	35	178	1.28
	$Y = 21.7x^{0.0862}$	0.784			
	$Y = 24.6 + 0.136x - 0.0006x^2$	0.731			
2021	Слабая взаимосвязь	<0.30	–	200	1.04
2022	$Y = 15.0x^{0.0564}$	0.718	40	257	0.54
	$Y = 16.8 + 0.043x - 0.0001x^2$	0.658			

Примечание. Z – запасы N-NO₃ в слое почвы 0–40 см, кг/га.

Таблица 6. Влияние удобрений на запасы N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в фазе уборки викоовсяной (горохоовсяной) смеси в годы исследования, кг/га

Вариант	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее
1. Контроль	22.3	19.2	10.6	20.9	20.4	8.1	8.1	29.7	17.4
2. Известкование	28.6	25.4	11.4	32.0	32.6	8.3	18.1	40.1	24.6
3. Известкование	19.7	21.6	11.7	34.5	29.0	6.7	22.6	48.6	24.3
4. N60	61.2	34.8	16.9	55.1	95.4	9.3	14.0	204	61.3
5. N75	74.6	43.6	25.9	49.5	92.8	11.4	52.7	260	76.3
6. Навоз 40 т/га	31.6	22.6	9.3	26.9	32.4	8.9	82.4	26.3	30.0
7. Навоз 60 т/га	20.5	28.7	13.6	28.7	38.7	9.3	14.7	25.2	22.4
8. Навоз 80 т/га	29.0	27.2	9.9	20.5	23.2	8.4	24.1	23.9	20.8
9. Навоз 40 т/га	24.1	18.6	8.1	25.0	31.8	11.8	25.2	27.7	21.5
10. Нав40 + N60	62.5	41.6	15.8	42.2	96.5	14.7	22.3	161	57.1
11. Нав40 + N75	58.1	49.4	17.6	43.5	94.3	9.1	63.1	221	69.5
12. Нав60	34.8	25.0	13.1	27.2	28.7	9.8	94.6	31.7	33.1
13. Нав60 + N60	72.0	36.0	23.4	38.7	95.5	8.9	25.7	202	62.8
14. Нав60 + N75	72.8	60.0	36.5	36.7	103	31.4	57.6	218	77.0
15. Нав80	33.4	31.2	12.3	33.6	26.6	9.2	93.8	55.7	37.0
16. Нав80 + N60	50.4	40.1	16.1	51.7	96.8	11.3	18.8	169	56.8
17. Нав80 + N75	72.0	52.6	24.0	58.4	92.5	19.7	55.5	237	76.5
Среднее	45.2	34.0	16.2	36.8	60.6	11.6	40.8	116	45.2

симости изменялись в зависимости от величины ГТК (x):

$$Z_{\max} = 450 - 445.6x + 184.8x^2,$$

$$n = 8, \quad R^2 = 0.860.$$

Минимальная величина параметра Z_{\max} (181 кг N-NO₃/га) отмечена при величине ГТК = 1.21. Рост его >1.21 (повышение увлажненности почвы) и засушливости вегетационного периода (ГТК < 1.21) повышал нитрификационную активность почвы. Резко возрастала она и при применении азота N_{аа} (табл. 4). К уборке запасы N-NO₃ в слое 0–40 см почвы за счет поглощения культурами снижались в 2 раза и более (табл. 6).

Запасы аммонийного азота в слое 0–40 см почвы в 3-й ротации (2007–2009 гг.) в 1-й срок наблюдений менялись от 95.2 до 276 кг/га, но резко снизились до 35.1–109 кг/га в 4-й ротации (2014–2016 гг.), т.е. в 2.4–2.7 раза (табл. 7). Высокие запасы N-NH₄ в 3-й ротации 7-польного севооборота были следствием избыточного применения азотных и органических удобрений на серых лесных почвах в конце 1980-х–начале 1990-х гг. [4]. В 2021–2022 гг. (5-я ротация) запасы N-NH₄ в 1-й срок наблюдения также увеличились с ростом интенсификации применения удобрений, но не превышали 109 кг/га.

В уборку (табл. 8) в 2007 г. (ГТК = 1.05) запасы N-NH₄ снизились со 145–258 до 67.6–178 кг/га, а в 2008 г. (ГТК = 1.92) они возросли с 95.2–258 до 140–346 кг/га. Достаточно высокое увлажнение в этот срок способствовало росту запасов как аммонийного, так и нитратного азота (табл. 5). В 2009 г. (ГТК = 1.09) в 1-й срок запасы N-NH₄ варьировали от 167 до 276 кг/га, а во 2-й – снизились до 115–164 кг/га.

В 4-й ротации в оба срока наблюдения запасы N-NH₄ были близкими (ГТК менялся от 0.94 до 1.34). В 2021 г. в 5-й ротации при ГТК = 1.04 при крайне неравномерном выпадении осадков в течение вегетации во 2-й срок наблюдения запасы N-NH₄ несколько снижались, а в 2022 г. (ГТК = 0.54) возросли с 28.5–107 до 112–256 кг/га. Как повышенное увлажнение, так и недостаток влаги и высокие температуры способствовали резкому возрастанию трансформации органических и органо-минеральных соединений азота почвы в аммонийную форму. Исходя же из определяющей роли запасов N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в фазе всходов (табл. 5) на урожайность трав, следует заключить, что аммонийный азот почвы в конечном счете трансформировался в нитратную форму, которую преимущественно и потребляли растения.

Таблица 7. Влияние удобрений на запасы N-NH₄ в слое 0–40 см почвы в фазе всходов викоовсяной (горохоовсяной) смеси в годы исследования, кг/га

Вариант	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее
1. Контроль	167	182	204	39.3	50.6	58.8	69.2	28.5	100
2. Известкование	152	138	212	35.1	56.6	48.1	77.0	34.1	94.0
3. Известкование	145	108	209	51.2	54.0	46.8	74.3	29.4	89.7
4. N60	209	176	216	49.3	66.0	65.9	82.4	88.0	119
5. N75	247	141	178	43.0	76.9	67.0	89.5	73.9	115
6. Навоз 40 т/га	257	196	167	35.7	54.4	60.3	69.3	54.3	112
7. Навоз 60 т/га	245	132	216	35.4	62.7	58.2	91.3	41.0	110
8. Навоз 80 т/га	258	164	175	45.9	54.5	52.0	77.9	42.3	109
9. Навоз 40 т/га	255	162	232	43.0	71.5	60.5	85.0	41.3	119
10. Нав40 + N60	183	169	216	39.5	66.7	73.7	95.0	52.5	112
11. Нав40 + N75	156	219	216	46.0	66.6	64.2	106	52.9	116
12. Нав60	230	177	276	54.1	64.3	54.6	77.7	35.9	121
13. Нав60 + N60	162	188	270	67.1	63.0	63.1	94.5	57.9	121
14. Нав60 + N75	249	165	269	42.3	68.2	65.0	108	80.2	131
15. Нав80	211	95.2	245	41.0	50.3	60.4	93.9	49.5	106
16. Нав80 + N60	166	106	251	36.3	72.1	62.3	102	51.5	106
17. Нав80 + N75	253	258	248	56.2	69.6	58.1	109	107	145
Среднее	208	163	224	44.7	62.8	59.9	88.4	54.1	113

Таблица 8. Влияние удобрений на запасы N-NH₄ в слое 0–40 см в фазе уборки викоовсяной (горохоовсяной) смеси в годы исследования, кг/га

Вариант	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее
1. Контроль	88.6	248	124	49.0	40.7	57.6	58.2	132	99.8
2. Известкование	81.3	192	140	60.2	48.7	61.4	71.5	112	95.8
3. Известкование	67.6	140	134	59.0	47.2	63.2	66.2	159	92.0
4. N60	154	277	158	61.2	46.2	64.4	70.8	144	122
5. N75	152	299	144	72.5	51.8	68.0	79.0	256	140
6. Навоз 40 т/га	112	252	128	54.9	50.7	60.4	57.9	192	113
7. Навоз 60 т/га	117	246	149	52.0	52.0	58.4	72.8	168	114
8. Навоз 80 т/га	123	236	143	57.2	41.6	56.2	60.4	184	121
9. Навоз 40 т/га	148	229	130	61.4	50.0	69.7	65.4	201	119
10. Нав40 + N60	122	290	167	57.2	56.3	65.9	79.5	152	124
11. Нав40 + N75	80.5	279	115	58.2	52.8	68.2	97.6	192	118
12. Нав60	124	292	156	56.8	53.9	65.8	65.2	165	122
13. Нав60 + N60	90.2	334	164	47.0	47.7	67.6	81.8	152	123
14. Нав60 + N75	178	226	157	60.1	58.4	69.2	96.6	150	124
15. Нав80	97.3	346	143	55.5	52.3	63.0	83.6	159	125
16. Нав80 + N60	96.5	333	143	66.3	58.2	73.8	90.6	110	121
17. Нав80 + N75	139	284	148	61.9	51.2	68.8	88.0	200	130
Среднее	116	265	144	58.3	50.6	64.8	75.6	166	118

Таблица 9. Влияние удобрений на содержание аммонийного азота в почве и водной вытяжке 1 : 1 в слоях 0–20 и 20–40 см почвы в 2021 г., мг/100 г почвы

Вариант	Слой, см	1-й срок			2-й срок		
		N-NH ₄	N-NH ₄ водн	W, %	N-NH ₄	N-NH ₄ водн	W, %
1. Контроль	0–20	1.61	0.0299	1.9	1.04	0.0212	2.0
	20–40	0.95	0.0261	2.8	0.70	0.0106	1.5
2. Известкование (фон)	0–20	1.54	0.0394	2.6	1.23	0.0114	0.9
	20–40	1.25	0.0413	3.3	1.18	0.0104	0.9
3. Фон + РК – последнее действие	0–20	1.45	0.0267	1.8	1.03	0.0238	2.3
	20–40	1.27	0.0386	3.0	1.09	0.0180	1.6
4. Фон + NPK	0–20	1.65	0.0474	2.9	1.15	0.0180	1.6
	20–40	1.37	0.0386	2.8	1.02	0.0116	1.1
5. Фон + 2 NPK	0–20	1.79	0.0655	3.7	1.76	0.0485	2.8
	20–40	1.49	0.0442	3.0	0.79	0.0184	2.3
7. Нав60 – последнее действие	0–20	1.74	0.0386	2.2	1.18	0.0164	1.4
	20–40	1.60	0.0299	1.9	0.82	0.0128	1.6
12. Нав60 + РК – последнее действие	0–20	1.58	0.0735	4.6	0.98	0.0298	3.0
	20–40	1.27	0.0394	3.1	0.95	0.0273	2.9
13. Нав60 + NPK	0–20	2.04	0.0321	1.6	1.31	0.0232	1.8
	20–40	1.44	0.0386	2.7	1.22	0.0147	1.2
14. Нав60 + 2 NPK	0–20	2.10	0.104	5.0	1.92	0.0413	2.2
	20–40	1.86	0.0413	2.2	1.14	0.0368	3.2
Среднее	0–20	1.75	0.0460	2.6	1.30	0.0260	2.0
	20–40	1.44	0.0433	3.0	1.00	0.0180	1.8

В работах [4–7, 9] установлено, что на серых лесных почвах Ополья, характеризующихся высокой емкостью катионного обмена, основное количество N-NH₄ поглощалось почвенным поглощающим комплексом (ППК). Переходящая в жидкую фазу часть его, а также внесенного с удобрениями, нитрифицировалась. Уменьшение концентрации N-NH₄ в жидкой фазе смещало равновесие в сторону пополнения его за счет десорбции. На степень перехода N-NH₄ в жидкую фазу и трансформацию его в нитратную форму влияли содержание гумуса, рН_{KCl} почвы, емкость ее катионного обмена. Образовавшийся N-NO₃, полностью находящийся в жидкой фазе почвы, в основном участвовал в питании азотом возделываемых культур. Поэтому об участии N-NO₃ в питании растений нами было предложено судить по отношению содержания N-NO₃ в почве к содержанию N-NH₄ в водной вытяжке (1 : 1), определяемому с помощью ионоселективного электрода на ионы NH₄⁺.

В табл. 9 и 10 приведены данные по содержанию N-NH₄ в почве (солевая вытяжка) и водной вытяжке (1 : 1) в зависимости от примененных

удобрений в слоях 0–20 и 20–40 см почвы в фазах всходов и уборки.

Видно, что в фазе всходов культур в 2021 г. степень перехода N-NH₄ в жидкую фазу (W, %; водную вытяжку 1 : 1) в зависимости от уровня применения удобрений и глубины отбора образцов варьировала от 1.5 до 5.0%. Степень перехода (W) возрастала с повышением содержания N-NH₄ в почве и в среднем в 17-ти вариантах была более высокой в слоях 20–40 см почвы, чем в слоях 0–20 см, что совпадало с более высокой увлажненностью нижних слоев. В фазе уборки средние запасы N-NH₄ в слое 0–40 см снизились примерно на 16% (табл. 7 и 8), в большей мере происходило снижение степени перехода N-NH₄ в жидкую фазу в удобренных азотом вариантах и при последствии органических удобрений. В среднем в 17-ти вариантах уменьшилась и средняя концентрация N-NH₄ в жидкой фазе: с 0.0433–0.0466 до 0.0180–0.0260 мг/100 г почвы.

В 2022 г. степень перехода N-NH₄ в жидкую фазу в 1-й срок наблюдения в слое 0–40 см почвы варьировала от 1.0 до 5.9%, возрастала с уровнем интенсификации. В среднем в 17-ти вариантах

Таблица 10. Влияние удобрений на содержание аммонийного азота в почве и водной вытяжке 1 : 1 в слоях 0–20 и 20–40 см почвы в 2022 г., мг/100 г почвы

Вариант	Слой, см	1-й срок			2-й срок		
		N-NH ₄	N-NH ₄ водн	W, %	N-NH ₄	N-NH ₄ водн	W, %
1. Контроль	0–20	0.55	0.0132	2.4	1.41	0.0168	1.2
	20–40	0.50	0.0125	2.5	3.32	0.0143	0.4
2. Известкование (фон)	0–20	0.68	0.0153	2.2	2.09	0.0104	0.5
	20–40	0.57	0.0125	2.2	2.00	0.0073	0.4
3. Фон + РК – последствие	0–20	0.60	0.0164	2.7	2.82	0.0147	0.5
	20–40	0.48	0.0097	2.0	2.90	0.0062	0.2
4. Фон + NPK	0–20	2.41	0.143	5.9	4.04	0.111	2.8
	20–40	0.88	0.0321	3.6	1.36	0.0150	1.1
5. Фон + 2 NPK	0–20	2.19	0.112	5.1	5.75	0.161	2.8
	20–40	0.59	0.0101	1.7	3.68	0.0150	0.4
7. Нав60 – последствие	0–20	0.87	0.0180	2.1	3.60	0.0299	0.8
	20–40	0.64	0.0067	1.0	2.58	0.0119	0.5
12. Нав60 + РК – последствие	0–20	0.54	0.0261	4.8	2.94	0.0314	1.1
	20–40	0.76	0.0314	4.1	3.08	0.0161	0.5
13. Нав60 + NPK	0–20	1.55	0.0557	3.6	2.36	0.0433	1.8
	20–40	0.61	0.0161	2.6	3.14	0.0131	0.4
14. Нав60 + 2 NPK	0–20	2.19	0.140	6.4	3.56	0.0990	2.8
	20–40	0.81	0.0147	1.8	1.98	0.0168	0.8
Среднее	0–20	1.18	0.0465	3.9	3.34	0.0451	1.4
	20–40	0.70	0.0171	2.4	2.68	0.0161	0.6

она была более высокой в слое 0–20 см, чем в слое 20–40 см. Средние запасы N-NH₄ в жидкой фазе в слое 0–20 см почвы составили 0.0465, в слое 20–40 см – 0.0171 мг/100 г почвы. Во 2-й срок наблюдения они оказались близкими (0.0451 и 0.0161 мг/100 г почвы). При этом средние запасы N-NH₄ в почве в слое 0–40 см возросли примерно в 3 раза (с 54.1 до 166 кг/га) (табл. 7, 8). Но в условиях острого дефицита влаги и повышенных температур в мае и июне наблюдали высокое снижение степени перехода N-NH₄ почвы в жидкую фазу.

На основании данных содержания нитратов в слоях 0–20 и 20–40 см почвы и содержанию в них N-NH₄ в жидкой фазе (табл. 9 и 10) для 2021 и 2022 гг. в табл. 11 представлены данные их соотношения.

В фазе всходов в слое 0–20 см в 2021 г. средняя величина этого параметра составила 60.4, в 2022 г. – 64.2. В этом случае доля N-NH₄ в жидкой фазе почвы от суммы N-NO₃ и N-NH₄ в ней составляла соответственно 1.6 [100 : (60.4 + 1)] и 1.5% [100 : (64.2 + 1)]. Следовательно, в питании культур преимущественно участвовал N-NO₃ (на 98.4 и 98.5% соответственно). Низкие средние величи-

ны доли N-NH₄ в жидкой фазе почвы установлены и в слое 20–40 см в 2021 и 2022 г. в фазах всходов (3.1 и 1.1%) и уборки в обоих слоях (<2.4%).

Средний разностный коэффициент использования (КИ) применения дозы N60 за 8 опыто-лет составил 46.2%, по последствию навоза 40–80 т/га – 40.0–(40–44.5)%, дозы N75 – соответственно 48.9 и 41.3–47.6% (табл. 12). На серых лесных почвах Ополья как по окупаемости удобрений прибавкой (9.0–11.8 кг/кг N при дозе N60 и 8.8–11.1 кг/кг N при дозе N75), так и коэффициентам использования, применение доз N60 и N75 было в одинаковой мере эффективным приемом.

Так как урожайность трав определялась преимущественно их питанием нитратной формой азота, то была проведена оценка накопления этой формы азота в течение вегетационного периода культуры.

Общие размеры нитрификационной способности почвы под травами за вегетационный период можно рассчитать по сумме выноса азота урожаем (сено и пожнивно-корневые остатки) и остаточным количеством азота нитратов в слое 0–40 см почвы в фазе уборки. По данным работы

Таблица 11. Соотношение N-NO₃ к N-NH₄ в жидкой фазе серой лесной почвы в зависимости от уровня интенсификации применения удобрений под однолетними травами

Вариант	Горизонт, см	Соотношение N-NO ₃ : N-NH ₄ в жидкой фазе			
		2021 г.		2022 г.	
		всходы	уборка	всходы	уборка
1. Контроль	0–20	50.5	16.5	81.1	35.7
	20–40	34.1	29.2	50.4	34.3
2. Известкование (фон)	0–20	42.1	43.8	69.9	77.9
	20–40	29.1	46.2	48.8	90.4
3. Фон + РК – последствие	0–20	69.7	12.2	64.0	98.0
	20–40	35.0	12.2	60.8	62.9
4. Фон + NPK	0–20	65.2	60.5	40.2	60.8
	20–40	34.2	111	86.0	65.3
5. Фон + 2 NPK	0–20	71.4	71.5	54.7	58.1
	20–40	39.4	70.1	180	38.0
7. Нав60 – последствие	0–20	56.7	16.5	83.9	18.1
	20–40	46.2	16.4	94.0	32.8
12. Нав60 + РК – последствие	0–20	13.7	16.8	71.3	26.4
	20–40	32.7	16.1	31.2	21.7
13. Нав60 + NPK	0–20	149	58.2	90.0	113
	20–40	37.3	53.1	118	196
14. Нав60 + 2 NPK	0–20	46.1	59.6	45.0	75.9
	20–40	38.2	50.5	95.9	46.4
Среднее (17 вариантов)	0–20	60.4	40.0	64.2	64.2
	20–40	31.6	41.4	89.0	73.3
Доля N-NH ₄ в жидкой фазе от суммы N-NH ₄ и N-NO ₃ , % (17 вариантов)	0–20	1.6	2.4	1.5	1.5
	20–40	3.1	2.4	1.1	1.3

[10], исходя из связи урожайности сена с размерами накопления пожнивно-корневых остатков (при условии близкого содержания в них азота), определили вынос азота сеном и пожнивно-корневыми остатками и общие размеры накопления N-NO₃ (табл. 13). По разнице между ними и запасами N-NO₃ в слое 0–40 см в фазе всходов оценивали прирост запасов N-NO₃ от всходов до уборки культур.

Общие размеры накопления N-NO₃ по сравнению с контролем и фоном известкования возрастали при применении азотных минеральных удобрений на 75–105 кг/га, их сочетания с последствием навоза – на 80–120, последствие органических – 20–30, сочетания последствие органических с РК-удобрениями – 25–40 кг/га.

Прирост запасов N-NO₃ от всходов до уборки трав был наиболее высоким в вариантах без применения минеральных удобрений (146 кг/га) и

при последствии фосфорно-калийных удобрений (150 кг/га) (табл. 14). Последствие органических удобрений повышало этот параметр, а действие минерального азота резко снижало его. Последнее было обусловлено его резким повышающим действием на нитрификационную активность почвы в ранний весенне-летний период (до всходов культур).

По соотношению выноса азота сеном и общего размера накопления N-NO₃ рассчитывали КИ накопленных за вегетацию запасов N-NO₃. Сравнение их с разностными КИ (табл. 12) в вариантах с внесением азотных минеральных удобрений показало их хорошее совпадение. По этим данным КИ накопленного за вегетацию культур N-NO₃ варьировали от 43 до 50%, а разностные КИ азота минеральных удобрений – от 40 до 49% (табл. 12, 13).

Следовательно, серые лесные почвы Ополя характеризуются высокой нитрификационной

Таблица 12. Вынос азота сеном викоовсяной (горохоовсяной) смеси (кг/га) и средний разностный коэффициент использования азота минеральных удобрений (КИ, %)

Вариант	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее	КИ
1. Контроль	67.2	93.5	95.8	84.6	89.9	74.6	100	82.2	86.0	—
2. Известкование	71.5	94.8	90.0	91.4	87.0	78.2	100	85.2	87.3	—
3. Известкование	68.4	112	96.0	85.2	97.0	95.7	111	90.3	94.4	—
4. N60	93.7	118	119	132	129	108	118	102	115	46.2
5. N75	102	128	148	125	134	108	138	107	124	48.9
6. Навоз 40 т/га	73.5	102	93.0	98.6	92.2	88.9	118	96.3	95.3	—
7. Навоз 60 т/га	70.8	102	101	105	105	91.7	124	100	100	—
8. Навоз 80 т/га	76.1	109	95.2	106	103	94.5	117	115	102	—
9. Навоз 40 т/га	76.2	98.9	101	93.9	99.6	95.8	129	101	99.4	—
10. Нав40 + N60	101	121	129	124	130	112	143	117	122	44.5
11. Нав40 + N75	109	130	142	132	144	123	141	124	131	47.6
12. Нав60	78.2	108	98.7	114	101	80.8	136	102	102	—
13. Нав60 + N60	95.6	120	133	134	135	111	146	117	124	40.0
14. Нав60 + N75	112	145	152	140	137	109	138	114	131	41.3
15. Нав80	81.6	111	98.2	114	92.0	86.2	129	104	102	—
16. Нав80 + N60	111	126	134	130	132	117	146	113	126	40.0
17. Нав80 + N75	120	136	151	132	147	115	146	120	133	41.3
Среднее	88.7	115	116	114	115	99.4	128	105	110	

Таблица 13. Средние за 8 опыто-лет размеры накопления (кг/га) и использования N-NO₃ за вегетационный период однолетних трав (%)

Вариант	Вынос N травами		Запасы N-NO ₃ в фазе уборки (слой 0–40 см)	Общие размеры накопления N-NO ₃	Запасы N-NO ₃ в фазе всходов	Прирост запасов N-NO ₃ от всходов до уборки	КИ _{N-NO₃}
	надземная масса (сено)	сено + пожнивно-корневые остатки					
1. Контроль	86.0	155	17.4	172	48.6	123	50.0
2. Известкование	87.3	157	24.6	182	53.0	129	48.0
3. Известкование	94.4	170	24.3	194	51.6	142	48.7
4. N60	115	196	61.3	257	137	120	44.8
5. N75	124	211	76.3	287	172	115	43.2
6. Навоз 40 т/га	95.3	172	30.0	202	48.8	153	47.1
7. Навоз 60 т/га	100	180	22.4	202	52.5	150	49.5
8. Навоз 80 т/га	102	184	20.8	205	52.2	153	49.8
9. Навоз 40 т/га	99.4	179	21.5	201	55.2	146	49.4
10. Нав40 + N60	122	207	57.1	264	140	124	46.2
11. Нав40 + N75	131	223	69.5	293	184	109	44.7
12. Нав60	102	184	33.1	217	63.5	154	47.0
13. Нав60 + N60	124	211	62.8	274	148	126	45.2
14. Нав60 + N75	131	223	77.0	300	186	114	43.7
15. Нав80	102	184	37.0	221	65.0	156	46.2
16. Нав80 + N60	126	214	56.8	271	151	120	46.5
17. Нав80 + N75	133	226	76.5	302	198	104	44.0

Таблица 14. Влияние удобрений на прирост запасов N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в период от всходов до уборки трав, кг/га

Последствие доз навоза, т/га	Применение минеральных удобрений				Среднее (навоз)
	0	последствие РК	N60	N75	
0	129	142	120	115	126
40	153	146	124	109	133
60	150	154	126	114	136
80	153	156	120	104	133
Среднее (минеральные удобрения)	146	150	122	110	

Примечание. Прирост запасов N-NO₃ в период от всходов до уборки в контроле составил 123 кг/га.

активностью. В среднем за 8 опыто-лет она резко возрастала с повышением уровня применения азота минеральных удобрений в дозе N75 от 170–180 (без удобрений) до 300 кг/га. Продуктивность однолетних трав в большинстве случаев лимитировало отсутствие оптимального увлажнения в ранний весенне-летний период.

ВЫВОДЫ

1. В длительном полевом опыте за 8 опыто-лет урожайность однолетних трав (викоовсяной, горохоовсяной смесей) в контроле изменялась от 15.1 до 26.1 ц з.е./га, при применении доз N60 и N75 – от 18.2 до 37.2 ц з.е./га, т.е. в зависимости от погодных условий варьировала в 1.73–1.88 раза. При этом азот N_{аа} обеспечивал повышение прибавки их урожайности на 88.3% от общей вариации, последствие навоза КРС, внесенного в начале ротации, – на 8.1%, последствие РК-удобрений, примененных под 6 культур 7-польного севооборота, – 1.8%. 1 кг азота N_{аа} в дозах N60 и N75 обеспечивал увеличение урожайности трав на 9.0 и 8.8 кг з.е., при последствии навоза 40–80 т/га – 9.6–11.8 кг з.е.

2. Запасы нитратного азота в слое 0–40 см почвы в фазе всходов трав были максимальными. В вариантах с применением дозы N60 по сравнению с вариантами без удобрений в среднем за 8 лет они возрастали с 49–53 до 137–151 кг/га, дозы N75 – до 172–198 кг/га. К уборке за счет поглощения нитратного азота растениями его запасы в этом слое снижались в 2 раза и более. Запасы N-NH₄ в этом слое в вариантах опыта в фазах всходов и уборки трав были близкими. В удобренных вариантах по сравнению с неудобренными они увеличивались всего в 1.4–1.6 раза.

3. За 7 лет из 8-ми установлена высокая степень взаимосвязи урожайности трав с запасами

N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в фазе всходов. Наблюдалась линейную, квадратичную и степенную взаимосвязи. Полученные результаты свидетельствовали об определяющей роли нитратного азота в питании трав азотом.

4. За 8 лет, исходя из достоверной квадратичной взаимосвязи максимальных запасов N-NO₃ в слое 0–40 см почвы в фазе всходов культур с гидротермическим коэффициентом (ГТК), установлена минимальная нитрификационная активность почвы при ГТК = 1.21. Повышение количества выпавших осадков, с одной стороны, так и температур в течение вегетационного периода, с другой, вело к увеличению запасов N-NO₃ в почве.

5. На серых лесных почвах Ополя, характеризующихся высокой емкостью катионного обмена, степень перехода N-NH₄ почвы в жидкую фазу (водную вытяжку 1 : 1) в 2021 г. не превышала 5.0, в 2022 г. – 5.9%. Она возрастала при применении азотных минеральных удобрений, изменялась от сроков (всходы, уборка) и глубины отбора (слои 0–20 и 20–40 см) образцов. Это вело к изменению содержания N-NH₄ в жидкой фазе почвы.

6. Предложено оценивать участие подвижных форм азота в питании возделываемых культур по величине соотношения содержания N-NO₃ в почве к содержанию N-NH₄ в водной вытяжке (1 : 1), т.к. нитратный азот полностью находится в жидкой фазе, а аммонийный азот почвы – частично. Указанное соотношение в 2021–2022 гг. варьировало от 12.2 до 184. Для этих величин доля N-NH₄ в жидкой фазе от суммы нитратного и аммонийного азота составляла соответственно 7.6 и 0.54%. Это подтвердило определяющую роль N-NO₃ в питании трав азотом.

7. Средние за 8 опыто-лет разностные коэффициенты использования (КИ) доз азотных удобрений составляли 40–49%, снижаясь с ростом уров-

ня применения удобрений. Величины разностных КИ азота N_{aa} достаточно хорошо совпадали с КИ накапливающегося $N-NO_3$ в течение вегетационного периода трав. Они варьировали от 43.2 до 50.0%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафонов А.Ф., Гатаулин А.М., Платонов И.Г. Системы земледелия / Под ред. Сафонова А.Ф. М.: КолосС, 2006. 447 с.
2. Окорков В.В. Удобрения и плодородие серых лесных почв Владимирского ополья. Владимир: ВООО ВОИ, 2006. 356 с.
3. Минеев В.Г., Сычев В.Г., Гамзиков Г.П. Агрохимия: Классич. универ. учеб-к для стран СНГ / Под ред. Минеева В.Г. М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2017. 854 с.
4. Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А. Серые лесные почвы Владимирского ополья и эффективность использования их ресурсного потенциала. Иваново: ПресСто, 2021. 188 с.
5. О влиянии удобрений, гумуса и физико-химических свойств серых лесных почв Ополья на подвижные формы азота // Владимир. земледелец. 2022. № 4. С. 22–31. <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2022-4-22-31>
6. Окорков В.В., Окоркова Л.А. Удобрения и питание азотом яровой пшеницы на серых лесных почвах // Агрохим. вестн. 2023. № 1. С. 35–42.
7. Окорков В.В., Шукин И.М., Окоркова Л.А., Шукина В.И., Козлов А.А. Изменение содержания подвижных форм азота в серых лесных почвах Ополья под влиянием ландшафтных особенностей агротехнологий // Агрохимия. 2023. № 1. С. 13–24.
8. Ягодин Б.А., Дерюгин И.П., Жуков Ю.П. Практикум по агрохимии / Под ред. Ягодина Б.А. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
9. Окорков В.В., Окоркова Л.А. О влиянии удобрений, гумуса и физико-химических свойств серых лесных почв Ополья на подвижные формы азота // Владимирский. земледелец. 2022. № 4. С. 22–31.
10. Попов П.Д., Хохлов В.И., Егоров А.А. Органические удобрения: Справ-к. М.: Агропромиздат, 1988. 207 с.

Fertilization of Annual Grasses on Gray Forest Soils of the Vladimir Opole

V. V. Okorkov^{a,#}, L. A. Okorkova^a, and A. E. Lebedeva^a

^aVerkhnevolzhsky Federal Agrarian Scientific Center
d. Novaya, Vladimir region, Suzdal district 601261, Russia

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

In a long-term stationary experiment, the effect of fertilizers on the yield of annual grasses (vetch and pea mixtures) and the nitrifying activity of gray forest soils were studied. For 8 years, both without the use of fertilizers and with them, the yield of herbs changed by 1.72–1.88 times. It was found that the use of nitrogen of mineral fertilizers provided 88.3% of the total variation in their yield, the aftereffect of manure – 8.1, the aftereffect of PK fertilizers – 1.8%. For 7 out of 8 years, a high degree of correlation between the yield of grasses and the reserves of $N-NO_3$ in the 0–40 cm layer of soil in the phase of grass germination was revealed. At the same time, the minimum reserves of $N-NO_3$ were formed at a hydrothermal coefficient for the growing season equal to 1.21. The use of fertilizers, increased moisture content and temperatures during the growing season of grasses led to an increase in the nitrification activity of gray forest soil. It is proposed to evaluate the participation of mobile forms of nitrogen in plant nutrition in relation to the content of $N-NO_3$ in the soil to the content of $N-NH_4$ in the water extract (1 : 1). The values of this parameter in the phases of germination and harvesting of grasses confirmed the determining role of $N-NO_3$ reserves in the nutrition of annual grasses. The difference coefficients of the use of nitrogen N_{aa} in doses N60 and N75, which ranged from 40 to 49%, were calculated. An algorithm for calculating the size of the accumulation of $N-NO_3$ during the growing season of grasses is proposed. In nitrogen-fertilized variants, a good coincidence of the utilization coefficients of accumulating $N-NO_3$ reserves with the difference ones has been established.

Keywords: gray forest soils, Vladimir Opole, yield, nitrate and ammonium nitrogen reserves, the degree of transition of ammonium nitrogen of the soil to the liquid phase, removal of N by grasses, the ratio of $N-NO_3$ and $N-NH_4$ contents in the liquid phase of the soil.