

Питание растений азотом на серых лесных почвах Верхневолжья

В.В. Окорков, д.с.-х.н., Л.А. Окоркова, ст.н.с., О.А. Фенова, к.с.-х.н., ФГБНУ Верхневолжский ФАНЦ

Распаханные серые лесные почвы в Верхневолжье занимают площадь 305 тыс. га [1]. По сравнению с окружающими дерново-подзолистыми почвами они имеют значительный пахотный горизонт (25–30 см), более высокое содержание гумуса (2,3–4,5%), меньшую кислотность ($pH_{КС1}$ – 5,2–6,5). Они нередко богаты карбонатами и отличаются высокой степенью насыщенности основаниями (75–95%), а также лучше обеспечены азотом и зольными элементами [2]. По всему почвенному профилю в них отсутствует обменный алюминий в количестве, токсичном для корневых систем возделываемых культур [3].

Решающая роль азотных удобрений в повышении продуктивности возделываемых культур выявлена на дерново-подзолистых почвах Центрального региона [4]. Азотные удобрения и навоз оказывают определяющее влияние на продуктивность 8- и 7-польных севооборотов и на серых лесных почвах Верхневолжья [5]. При этом установлена тесная степенная или гиперболическая связь средней ежегодной продуктивности их со средними запасами нитратного азота в слое почвы 0–40 см в ранний период вегетации возделываемых культур. Такие же взаимосвязи были установлены между первым параметром и суммой запасов нитратного и аммонийного азота в жидкой фазе почв в ранний период вегетации культур в тот же срок (мобильным фондом азота) [6]. Содержание аммонийного азота в ней оценивали расчётным путём. В то же время концентрацию и запасы аммонийного азота в жидкой фазе почвы можно определить и с по-

мощью ионоселективного электрода на ионы NH_4^+ . Поэтому целью исследования было сравнение расчётных и экспериментальных значений содержания аммонийного азота в жидкой фазе серых лесных почв Верхневолжья.

Материал и методы исследования. Исследование выполнено на основе почвенных образцов многолетнего стационарного опыта ФГБНУ «Верхневолжский ФАНЦ», заложенного на серых лесных почвах в 1991–1993 гг. Опыт был развернут в трёх полях в севообороте: 1) занятой пар (викоовсяная смесь); 2) озимая рожь; 3) картофель; 4) овёс с подсевом трав (клевер + тимофеевка); 5) травы 1-го года пользования; 6) травы 2-го года пользования; 7) озимая рожь; 8) ячмень. Опыт разворачивался по одному полю севооборота в год. Повторность его трёхкратная, площадь делянки 100 м² (5×20 м). Размещение делянок рендомизированное. Площадь учётной делянки при уборке зерновых составляет 44 м², картофеля – 28 м². Урожай однолетних и многолетних трав учитывали парцеллярным способом [7].

В начале первой ротации проводили известкование по полной гидролитической кислотности. На его фоне изучали влияние различных доз подстилочного навоза КРС (40; 60 и 80 т/га) за севооборот, вносимых под озимую рожь после уборки занятого пара.

Кроме того, определяли степень воздействия минеральных удобрений, их сочетания на агрохимические (ежегодно), химические и физикохимические (в конце ротации) параметры серых лесных почв в слое 0–40 см. Во второй и третьей ротациях севооборота изучали последствие известкования.

В первой ротации одинарная доза минеральных удобрений под зерновые культуры, однолетние и многолетние травы составляла $P_{40}K_{40}$ и $N_{40}P_{40}K_{40}$, под картофель – $P_{60}K_{80}$ и $N_{60}P_{60}K_{80}$. Под травы 1-го года пользования во всех ротациях в качестве двойной дозы полного минерального удобрения использовали $N_{40}P_{80}K_{80}$. Во 2-й ротации под однолетние травы фосфорно-калийные удобрения не применяли. Одинарную и двойную дозы NPK под них заменили соответственно на N_{60} и N_{75} . Осимую рожь, высеваемую после трав 2-го года пользования, заменили яровой пшеницей. Под неё в качестве одинарных доз использовали $P_{60}K_{60}$ и $N_{60}P_{60}K_{60}$. В 3-й ротации (2007–2015 гг.) из севооборота исключили картофель, после занятого пара высеивали яровую пшеницу, трав 2-го года пользования – озимую пшеницу. Под зерновые культуры и травы 1-го и 2-го годов пользования в качестве одинарных доз использовали $P_{40}K_{40}$ и $N_{40}P_{40}K_{40}$.

В опыте применяли аммиачную селитру, простой или двойной суперфосфат, калийную соль. Фосфорно-калийные удобрения вносили осенью под основную обработку почвы или поверхностно под многолетние травы, азотные – весной под предпосевную культивацию под однолетние травы и яровые зерновые, в подкормку озимых и многолетних трав [7].

Перед закладкой опыта степень насыщенности основаниями варьировала от 83 до 87%, а величина гидролитической кислотности – от 3,2 до 4,6 мг-экв/100 г почвы, обменная кислотность – от 0,09 до 0,13 мг-экв/100 г почвы. Кислотность почвы обусловлена в основном ионами водорода и не наносила особого вреда культурным растениям. Малые величины обменной кислотности и обменного алюминия как в пахотном, так и подпахотном горизонтах токсично не влияли на развитие корневых систем возделываемых культур и не препятствовали проникновению их в более глубокие слои [7].

Во всех ротациях солома зерновых измельчалась, заделывалась в почву основной обработкой.

Агрохимические анализы почвы и растений выполняли по методикам, изложенным в работе Б.А. Ягодина и др. [8]. Запасы в почве нитратного (потенциометрический метод) и аммонийного

(метод индофеноловой зелени) азота рассчитывали непосредственно по данным их содержания [8]. Объёмную массу почвы в слое 0–20 см почвы приняли равной $1,3 \text{ г/см}^3$, а в слое 20–40 см – $1,44 \text{ г/см}^3$.

Результаты исследования. Известно, что нитрат-ионы в большинстве почв не поглощаются обменным комплексом почвы и находятся в жидкой фазе. Их адсорбция возможна в краснозёмах, характеризующихся положительным зарядом ППК [9]. Ионы же аммония адсорбируются ППК в разной степени в зависимости от его свойств, что ведёт к снижению в несколько раз коэффициентов использования возделываемыми культурами запасов аммонийного азота в почве по сравнению с запасами нитратного азота [5].

Наблюдения за динамикой среднегодовых запасов $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы за 1992–2008 гг. показали, что среднегодовая продуктивность 8-польного зернотравяно-пропашного севооборота по тесной степенной или гиперболической зависимостям возрастала от указанных запасов в ранний период вегетации культур [5]. Такую же тесную связь среднегодовой продуктивности севооборота наблюдали и с мобильным фондом азота. Он представляет сумму запасов нитратного и аммонийного азота в слое 0–40 см в жидкой фазе почвы в ранний период вегетации культур. Эти запасы аммонийного азота в жидкой фазе почвы определяли расчётным способом. За 1992–2008 гг. данные по средней доле запасов $N-NH_4$ в жидкой фазе серой лесной почвы от исходных запасов в ранний период вегетации представлены в таблице 1. Сами же исходные запасы варьировали от 174 до 201 кг/га.

По данным таблицы видно, что средняя расчётная доля запасов $N-NH_4$ в жидкой фазе серой лесной почвы в ранний период вегетации культур от их запасов в почве варьировала от 14,0 до 23,9%. В среднем по четырём уровням применения минеральных удобрений (0, PK, NPK, 2NPK) она слабо зависела от доз внесения органических удобрений (19,9–21,0%). Применение полного минерального удобрения на фоне четырёх доз органических удобрений (0; 40; 60 и 80 т/га навоза за севооборот) повысило этот параметр с 19,2 (без минеральных удобрений) до 22,2–22,6%. Слабо влияло на эту

1. Влияние удобрений на среднюю долю запасов $N-NH_4$ в жидкой фазе серой лесной почвы в слое 0–40 см в ранний период вегетации культур от их исходных запасов в почве за 1992–2008 гг. (на фоне действия и последствий известки), %

Доза навоза за севооборот, т/га	Средние ежегодные дозы минеральных удобрений				Среднее по навозу
	–	PK	NPK	2NPK	
–	14,9	20,9	20,5	23,2	19,9
40	18,5	16,7	25,3	23,6	21,0
60	22,9	17,4	23,5	19,8	20,9
80	20,6	17,6	19,5	23,9	20,4
Среднее по минеральным удобрениям	19,2	18,2	22,2	22,6	

Примечание: в варианте абсолютного контроля доля аммонийного азота в жидкой фазе составила 14,0%.

долю использование фосфорно-калийных удобрений.

В то же время в практике сельскохозяйственного использования и в научных целях важно оценить запасы в почве нитратного и аммонийного азота в жидкой фазе в ранние периоды вегетации той или иной культуры. Для определения содержания аммонийного азота в жидкой фазе можно использовать ионоселективный плёночный электрод ЭЛИС-121NH₄. Величина pH анализируемого раствора должна быть в пределах от 2 до 10. Определению активности ионов NH₄⁺ не мешает в сотни раз более высокая концентрация ионов Na⁺, Ca²⁺ и Mg²⁺. 8–10-кратный избыток ионов калия над ионами NH₄⁺ может несколько влиять на его электродную функцию.

На образцах отбора в конце второй ротации с высокими запасами аммонийного азота в слое почвы 0–40 см (199–339 кг/га) была изучена взаимосвязь между содержанием его в почве (метод индофеноловой зелени) и в водной вытяжке при соотношении почва: вода 1:1 (табл. 2). В последнем случае образцы взбалтывались в течение 3 минут. После отстаивания в них определяли активность ионов NH₄⁺, которая при величинах $5 > pNH_4 > 3$ была близка к их концентрации (pNH_4 – отрицательный десятичный логарифм активности ионов NH₄⁺ в жидкой фазе).

Данные таблицы 2 и уравнений (1) и (2) показывают, что в слоях почвы 0–20 и 20–40 см наблюдалась тесная линейная связь между содержанием ионов аммония в почве и водной вытяжке, свидетельствующая о применимости потенциометрического метода определения ионов аммония в жидкой фазе серых лесных почв Верхневолжья:

$$Y_{0-20} = 0,133 + 0,078(x-4), n = 17, R^2 = 0,871; (1)$$

$$Y_{20-40} = 0,048 + 0,053(x-2,5), n = 17, R^2 = 0,832, (2)$$

где Y_{0-20} и Y_{20-40} – содержание N-NH₄ в водной вытяжке соответственно в слоях почвы 0–20 и 20–40 см в мг/100 г почвы;

x – содержание N-NH₄ в почве в соответствующих слоях её, мг/100 г почвы.

В верхнем более гумусированном слое содержание аммонийного азота как в почве, так и водной вытяжке было более высоким, чем в слое 20–40 см почвы (табл. 2). В верхнем слое более высока доля перехода N-NH₄ из обменного состояния в жидкую фазу (3,3–6,1%). Для подпахотного слоя почвы с более низким содержанием органоминеральных коллоидов она снижается до 1,7–4,6%. Следовательно, пахотные слои по сравнению с подпахотными в большей мере способны обеспечивать растения наиболее доступными формами аммонийного азота.

При сравнении данных таблиц 1 и 2 видно, что средняя расчётная доля ионов NH₄⁺ в жидкой фазе за 1992–2008 гг. была более высокая, чем экспериментально установленная. По нашему мнению, это обусловлено различиями в поглощении ионов NO₃⁻ и NH₄⁺ корнями растений. По-видимому, ионы NO₃⁻ в растения поступают преимущественно пассивно, а ионы NH₄⁺ при очень низкой концентрации его в жидкой фазе (10⁻⁴–10⁻⁵ г-ион/л) – с помощью активных переносчиков. Последний процесс протекает с затратой энергии. Возможен и перенос ионов аммония в корни без перехода в жидкую фазу при контакте их с поверхностью почвенных коллоидов.

Потепление климата, заметно проявившееся с 2010 г., и экономное внесение удобрений способствовали активному переходу аммонийного азота в нитратную форму, которая быстро поглощалась возделываемыми культурами. Это привело к снижению содержания аммонийного азота как в пахотном,

2. Взаимосвязь между содержанием аммонийного азота в почве и водной (1:1) вытяжке под ячменём (поле №2, 2007 г.), мг/100 г почвы

Вариант	Содержание N-NH ₄ в слое 0–20 см			Содержание N-NH ₄ в слое 20–40 см		
	в почве	в водной вытяжке (1:1)	доля N-NH ₄ в водной вытяжке, %	в почве	в водной вытяжке (1:1)	доля N-NH ₄ в водной вытяжке, %
Контроль	5,77	0,249	4,32	3,42	0,099	2,90
Известь (фон – Ф)	6,92	0,377	5,45	4,23	0,134	3,17
Ф+РК	4,40	0,161	3,66	2,97	0,074	2,49
Ф+NPK	4,65	0,193	4,15	2,73	0,053	1,94
Ф+2NPK	4,10	0,153	3,73	4,76	0,168	3,53
H ₄₀	5,64	0,243	4,31	4,06	0,131	3,23
H ₆₀	5,26	0,202	3,91	5,21	0,157	3,01
H ₈₀	6,40	0,300	4,69	2,70	0,067	2,48
H ₄₀ + РК	6,68	0,321	4,80	3,49	0,104	2,98
H ₄₀ + NPK	6,77	0,314	4,64	3,53	0,060	1,70
H ₄₀ + 2NPK	6,24	0,314	5,03	4,63	0,168	3,63
H ₆₀ + РК	4,17	0,137	3,28	4,10	0,125	3,05
H ₆₀ + NPK	6,02	0,279	4,63	3,06	0,104	3,40
H ₆₀ + 2NPK	6,79	0,413	6,08	5,64	0,261	4,63
H ₈₀ + РК	5,44	0,306	5,62	3,23	0,111	3,44
H ₈₀ + NPK	4,84	0,202	4,17	4,47	0,143	3,20
H ₈₀ + 2NPK	5,82	0,306	5,26	4,04	0,137	3,39
Среднее	5,64	0,263	4,66	3,90	0,123	3,15

так и подпахотном слое почвы. В 2018 г. по сравнению с 2007 г. наблюдали снижение содержания аммонийного азота в слое 0–20 см с 4,10–6,92 (табл. 2) до 0,67–2,02 мг/100 г почвы (табл. 3). Этому способствовали и низкая температура воздуха в мае и начале июня и недостаток влаги в июне. В 1-й декаде июня его температура была на 2,5°C ниже, чем по многолетним данным, а за месяц выпало около 37% осадков от нормы. Это замедляло процессы аммонификации и нитрификации. Запасы аммонийного азота в слое 0–40 см почвы в первый и второй сроки наблюдений были близкими и по вариантам опыта варьировали от 28,9 до 75,6 кг/га.

Доля N-NH₄ в водной вытяжке от его содержания в слое почвы 0–20 см (0,67–2,02 мг/100 г почвы) варьировала от 5,1 до 12,5% и составляла в среднем 7,2% по всем вариантам опыта. Среднее содержание аммонийного азота в слое 20–40 см почвы составило 0,63 мг/100 г почвы. По сравнению со слоем 0–20 см оно уменьшилось в 1,6 раза, а размеры перехода ионов NH₄⁺ в жидкую фазу – в 1,3 раза. Следовательно, со снижением содержания гумуса прочность связи ионов NH₄⁺ с поглощающим комплексом заметно увеличивается.

Сравнив данные таблиц 2 и 3, установили, что с увеличением в почве содержания аммонийного азота относительные размеры перехода его в жидкую фазу почвы могут снижаться, а абсолютные – увеличиваться.

В июле 2018 г. температура воздуха резко возросла до 19,2–22,1°C (среднемноголетняя 18,2°C), выпало 53% осадков от нормы. Это привело к некоторому росту запасов аммонийного азота в почве до 49,6–73,8 кг/га.

В слое почвы 0–20 см по сравнению с первым и вторым сроками наблюдения в третий срок среднее содержание аммонийного азота по вариантам опыта возросло в 1,3 раза (с 1,03 до 1,36 мг/100 г почвы), в слое 20–40 см – в 1,5 раза (с 0,63 до 0,98 мг/100 г почвы). В то же время сильное иссушение почвы привело к прочной фиксации ионов аммония глинистыми минералами с расширяющейся кристаллической решёткой [10, 11] и к снижению доли N-NH₄ в водной вытяжке. Средняя доля N-NH₄ в водной вытяжке от содержания аммонийного азота в третий срок наблюдений в слое почвы 0–20 см составила 2,6%, в слое 20–40–2,4%. По сравнению с первым и вторым сроками она снизилась в слое 0–20 см в 2,8 раза, в слое 20–40 – в 2,3 раза. Различия в переходе поглощённых ионов аммония с твёрдой фазы почвы в жидкую в слоях 0–20 и 20–40 см заметно уменьшились. Очевидно, в обоих слоях наблюдали резко возросшую фиксацию N-NH₄ глинистыми минералами.

Выводы

1. В связи с заметным потеплением климата (с 2010 г.) в 3-й ротации 7-польного севооборота по сравнению с 8-польным зернотравяно-пропашным на серых лесных почвах Верхневолжья запасы аммонийного азота в слое 0–40 см почвы снизились от 174–339 кг/га до 29–74 кг/га (2018 г.).

2. На серых лесных почвах Верхневолжья с помощью ионоселективного электрода на ионы NH₄⁺ определена степень перехода аммонийного азота почвы, вытесняемого 1 М раствором KCl, в жидкую фазу почвы. Она изменялась от нескольких процентов до 12,5%. Установлено её возрастание с уменьшением содержания в почве аммонийного азота, в пахотном более гумусированном слое по сравнению с подпахотным слоем 20–40 см. Ис-

3. Взаимосвязь между содержанием аммонийного азота в почве и в водной (1:1) вытяжке под овсом (поле № 3, 2018 г., среднее по 1-му и 2-му срокам наблюдения), мг/100 г почвы

Вариант	Содержание N-NH ₄ в слое 0–20 см			Содержание N-NH ₄ в слое 20–40 см			Запасы N-NH ₄ в слое 0–40 см, кг/га
	в почве	в водной вытяжке (1:1)	доля N-NH ₄ в водной вытяжке, %	в почве	в водной вытяжке (1:1)	доля N-NH ₄ в водной вытяжке, %	
Контроль	0,67	0,056	8,4	0,40	0,044	11,0	28,9
Известь (фон – Ф)	0,68	0,048	7,1	0,58	0,030	5,2	34,3
Ф + РК	0,82	0,042	5,1	0,52	0,026	5,0	36,3
Ф + NPK	0,72	0,056	7,8	0,56	0,032	5,7	34,8
Ф + 2NPK	1,28	0,069	5,4	0,70	0,036	5,1	53,4
H ₄₀	0,78	0,066	8,5	0,84	0,028	3,3	44,5
H ₆₀	0,73	0,060	8,2	0,60	0,035	5,8	36,3
H ₈₀	0,98	0,050	5,1	0,75	0,030	4,0	47,1
H ₄₀ + РК	0,78	0,055	7,0	0,51	0,040	7,8	35,0
H ₄₀ + NPK	0,83	0,104	12,5	0,56	0,054	9,6	37,7
H ₄₀ + 2NPK	1,54	0,151	9,8	0,79	0,030	3,8	62,8
H ₆₀ + РК	0,82	0,054	6,6	0,52	0,023	4,4	36,3
H ₆₀ + NPK	1,44	0,088	6,1	0,55	0,034	6,2	53,3
H ₆₀ + 2NPK	2,02	0,098	4,8	0,80	0,034	4,2	75,6
H ₈₀ + РК	0,96	0,064	6,7	0,77	0,028	3,6	47,1
H ₈₀ + NPK	1,06	0,075	7,1	0,61	0,037	6,1	45,1
H ₈₀ + 2NPK	1,49	0,120	8,0	0,58	0,037	6,4	55,4
Среднее	1,03	0,074	7,2	0,63	0,034	5,5	44,9

сушение серой лесной почвы вело к заметному снижению степени перехода ионов аммония в жидкую фазу.

3. При расчётном методе нахождения $N-NH_4$ в жидкой фазе (по снижению среднегодовых за ротацию севооборота запасов аммонийного азота в середине вегетации культур по сравнению с ранним периодом вегетации) установлены более высокие размеры перехода их в жидкую фазу, чем по экспериментально определяемым. Вероятно, это связано как с активным переносом ионов аммония в корни растений с помощью переносчиков NH_4^+ , так и с непосредственным контактным поступлением их с поверхности почвенных коллоидов без перехода в жидкую фазу.

4. Наблюдаемые различия в запасах аммонийного азота в жидкой фазе серых лесных почв Верхневолжья за первую и вторую ротации 8-польного севооборота существенно не влияли на форму зависимости средней продуктивности этого севооборота от мобильного фонда азота. Она по близким зависимостям изменялась как от мобильного фонда азота, так и запасов нитратного азота в слое почвы 0–40 см в ранний период вегетации культур, так как основу мобильного фонда составляли запасы нитратного азота.

5. Результаты исследования подтвердили неравноценность запасов нитратного и аммонийного азота в поглощении и использовании возделываемыми культурами севооборотов. Коэффициенты использования почвенных запасов нитратного азота в несколько раз выше, чем аммонийного.

В настоящее время для диагностики минерального питания азотом на серых лесных почвах Верхневолжья можно ограничиться определением запасов $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранние периоды вегетации культур.

Литература

1. Ненайденко Г.Н. Рациональное применение удобрений в условиях рыночной экономики. Иваново, 2007. 350 с.
2. Окорков В.В. Удобрения и плодородие серых лесных почв Владимирского Ополя. Владимир: ВООО ВОИ, 2006. 356 с.
3. Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А. Удобрение и продуктивность севооборотов на серых лесных почвах Верхневолжья // *Агрохимия*. 2018. № 2. С. 56–70.
4. Сычёв В.Г., Шафран С.А. Агрохимические свойства почв и эффективность минеральных удобрений. М.: ВНИИА, 2013. 296 с.
5. Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А. Удобрения и тренды в плодородии серых лесных почв Верхневолжья / ФГБНУ Верхневолжский ФАНЦ. Иваново, ПресСто, 2018. 228 с.
6. Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А. Эффективность минеральных удобрений при возделывании ячменя при последствии различных систем удобрения на серых лесных почвах Ополя // *Агрохимия*. 2018. № 7. С. 28–39.
7. Фенова О.А. Эффективность органических и минеральных удобрений в севообороте на серых лесных почвах Владимирского Ополя: дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2010. 180 с.
8. Практикум по агрохимии / Б.А. Ягодин, И.П. Дерюгин, Ю.П. Жуков [и др.]; под ред. Б.А. Ягодина. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
9. Алешин С.Н., Курбатов А.И., Окорков В.В. Электрокинетические свойства некоторых типов почв // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 1974. № 6.
10. Дубровина И.В., Градусов Б.П. Химико-минералогическая характеристика почв Владимирского Ополя // *Почвоведение*. 1993. № 3. С. 64–73.
11. Чижикова Н.П., Окорков В.В., Карпова Д.В. Оценка резервов элементов питания Владимирского Ополя в связи с их минералогическим составом // *Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование: матер. первой Всерос. открытой конф.* / отв. ред. А.Л. Иванов; сост.: Э.Н. Молчанов, Л.Ф. Назарова. М., 2015. С. 448–461.