

УДК 631.416.1:631.445.25:631.51(470.314)

## ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ АЗОТА В СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ ОПОЛЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЛАНДШАФТНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ АГРОТЕХНОЛОГИЙ

© 2023 г. В. В. Окорков<sup>1,\*</sup>, И. М. Шукин<sup>1</sup>,  
Л. А. Окоркова<sup>1</sup>, В. И. Щукина<sup>1</sup>, А. А. Козлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Верхневолжский федеральный аграрный научный центр  
601261 Владимирская обл., Суздальский р-н, п. Новый, Россия

\*E-mail: okorkovvv@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022 г.

После доработки 22.08.2022 г.

Принята к публикации 14.10.2022 г.

В многолетнем стационарном опыте на серых лесных почвах Владимирского ополя изучены влияние агротехнологий возделывания полевых культур на содержание подвижных форм азота, их взаимосвязь с химическими и физико-химическими свойствами почвы, уровнями интенсификации. После длительного применения агротехнологий с повышением уровня применения удобрений выявлен рост запасов нитратного азота, степени перехода аммонийного азота почвы в жидкую фазу от содержания гумуса на уровне сильной взаимосвязи. Содержание N-NH<sub>4</sub> в почве снижало его величину. С ростом емкости катионного обмена величина этого параметра изменялась, проходя через максимум, рН<sub>KCl</sub> – через минимум. Установлены изменения в содержании гумуса и физико-химических свойствах почвенных разностей серых лесных почв: серой лесной плакорной, серой лесной среднеоподзоленной, серой лесной среднеоподзоленной со вторым гумусовым горизонтом.

*Ключевые слова:* серые лесные почвы, Владимирское ополье, содержание гумуса, физико-химические свойства, запасы нитратного азота, степень перехода аммонийного азота в жидкую фазу, корреляционно-регрессионный анализ.

DOI: 10.31857/S0002188123010088, EDN: FDVLSI

### ВВЕДЕНИЕ

На дерново-подзолистых [1–3] и серых лесных почвах Владимирского ополя [4] выявлена решающая роль азотных удобрений в повышении продуктивности возделываемых полевых культур в различных севооборотах. Однако в отдельные более благоприятные по увлажнению годы на легких дерново-подзолистых почвах при применении полного минерального удобрения отмечена более высокая урожайность полевых культур, чем на более плодородных серых лесных почвах Ополя. По разбиваемым в работах [5, 6] представлениям это связано с различиями в питании растений подвижными формами азота, формирующимися в процессе трансформации органических и азотных минеральных удобрений в зависимости от физико-химических свойств почвы (емкости катионного обмена, минералогического и гранулометрического состава). Исследования проводили на почвах Владимирского ополя.

В исследованиях [4, 5] установлено, что на слабкокислых серых лесных почвах известкование слабо влияло на урожайность полевых культур и продуктивность севооборотов. Это объяснено отсутствием в контроле и во всех вариантах известкования метровом слое этих почв обменного алюминия в токсичных для корневых систем возделываемых культур количествах. Известкование обеспечивало возможность распространения их в более глубокие влажные слои почвы при пересыхании верхних.

Средняя ежегодная продуктивность 8-польного зернотравяно-пропашного севооборота на 89.1–94.7% и 7-польного зернотравяного севооборота на 92–93% определялась применением азота минеральных удобрений и навоза крупного рогатого скота. Участие фосфорно-калийных удобрений повышало тесноту связи на 4.3–7.4%.

Поскольку решающее влияние на продуктивность севооборотов на серых лесных почвах Верхневолжья оказывало применение азота мине-

ральных удобрений и навоза, то в работах [4, 5] изучали трансформацию внесенных азотных удобрений и навоза КРС и связанную с ней среднюю ежегодную динамику содержания нитратного и аммонийного азота под культурами 7-польного севооборота.

К 1-му сроку наблюдений (отрастание озимых и многолетних трав, всходы яровых культур и однолетних трав) происходила трансформация внесенных азотных удобрений в нитраты, азота органического вещества почвы (гумуса, растительных остатков) и органических удобрений – в аммиачную и нитратную формы. Поэтому запасы последней в этот срок обычно были максимальными. К середине вегетации запасы  $N-NO_3$  снижались за счет интенсивного поглощения растениями, к уборке культур несколько возрастали, в засушливые годы могли уменьшаться.

Установлено [4, 5], что при применении азотных минеральных удобрений (аммиачной селитры) запасы нитратного азота в 1-й срок наблюдений в слое 0–40 см почвы повышались с 42.2 (контроль) до 90–160 кг/га, в то время как запасы аммонийного азота изменялись в небольших пределах (с 98.1 до 96–136 кг/га). В удобренных азотом вариантах поглощение  $N-NO_3$  (снижение его запасов во 2-й срок по сравнению с 1-м, кг/га) в ответственные фазы роста и развития культур было в 2.5–3.4 раза более высоким, чем  $N-NH_4$ . Очевидно, они играли определяющую роль в повышении продуктивности культур севооборота, т.к. полностью находились в жидкой фазе. Ионы аммония в почвах с высокой емкостью катионного обмена переходили в жидкую фазу в небольших количествах. Коэффициент использования запасов  $N-NO_3$  за 1-ю половину вегетации культур в слое 0–40 см почвы варьировал от 54 до 70%, запасов  $N-NH_4$  – от 7.5 до 26.1%.

Различия в размерах использования запасов  $N-NO_3$  и  $N-NH_4$  за указанный период были обусловлены полным нахождением нитратного азота в жидкой фазе почвы, аммонийного – частичным. За 1–4-ю ротации динамика запасов  $N-NO_3$  в слое 0–40 см почвы в течение вегетации культур была однотипной. Однако запасы  $N-NH_4$  в слое 0–40 см почвы в 1-й срок наблюдений по сравнению с 1-й и 2-й ротациями снизились в 3-й ротации в 1.58–1.77 раза, в 4-й – в 3–4 раза, а степень перехода  $N-NH_4$  почвы в жидкую фазу (соотношение почва : вода = 1 : 1) за те же годы в слое 0–20 см уменьшалась с 3.3–5.4 до 1.4–3.5% в 3-й ротации, до 0.6–2.4% – в 4-й ротации. Снижение как запасов  $N-NH_4$  в почве (в 3–4 раза), так и доли их перехода в жидкую фазу в 4-й ротации по

сравнению с 1-й и 2-й подтвердило слабую роль аммонийного азота и определяющую роль  $N-NO_3$  в питании возделываемых культур при применении научно обоснованных доз азотных удобрений.

Высокая прочность связи ионов аммония ППК (при высокой емкости катионного обмена, ЕКО) вела к решающей роли запасов  $N-NO_3$  в почве на продуктивность возделываемых культур и севооборотов, к более высокой агрономической эффективности минеральной и органо-минеральной систем удобрения по сравнению с органической. Это было связано с более быстрой трансформацией азота внесенных минеральных удобрений в ранние периоды вегетации культур в нитратную форму, чем азота органических.

Установлено [5], что 1 кг азота внесенных органических удобрений в слое 0–40 см почвы в 1-й и 2-й ротациях в ранний период вегетации культур обеспечивал накопление 0.18 кг нитратного азота, а 1 кг азота минеральных – 1.26 кг. В 3-й и 4-й ротациях севооборота величина накопления нитратного азота от 1 кг азота навоза повысилась с 0.18 до 0.35 и 0.39 кг, 1 кг азота аммиачной селитры – с 1.26 до 1.27 и 1.30 кг, эффективность азота навоза на накопление нитратного азота в почве по сравнению с аммонийным азотом селитры составила  $\frac{0.35}{0.64} \dots \frac{0.39}{0.65}$ , или 0.55–0.60. В 1-й и 2-й ротациях накопленные в период активной химизации запасы аммонийного азота в почве замедляли трансформацию азота органических удобрений в нитратную форму в ранние сроки вегетации культур.

Для слоев 0–20 и 2–40 см почвы в образцах 2007 и 2020 гг. была установлена тесная линейная связь содержания  $N-NH_4$  в почве ( $6.92 > x > 0.77$ , мг/100 г почвы) с размерами его перехода в водную вытяжку ( $W$ , %) [6]:

$$W = 0.28 + 0.743x, n = 68, t_{\text{сущ}} = 26.2, r^2 = 0.912, \text{доверительный интервал} = 0.98.$$

Очевидно, в этом случае на статистические параметры, определяющее влияние, оказали наиболее высокие величины вариант ( $x$ ), при которых повышалась подвижность аммонийного азота почвы, при более низких могли проявиться и другие факторы, влияющие на степень перехода аммонийного азота почвы в жидкую фазу. Для серых лесных почв ополья, характеризующихся высоким варьированием физико-химических и химических свойств, это требует дальнейших исследований.

В дополнение к сказанному следует сослаться на последние исследования и на дерново-подзолистых почвах [7, 8]. Например, на дерново-сла-

**Таблица 1.** Схема севооборотов агроландшафтного стационарного опыта

Севооборот				
1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Овес подсевом трав–многолетние травы 1-го года пользования–многолетние травы 2-го года пользования–ячмень–чистый пар–озимая пшеница	Овес подсевом трав–многолетние травы 1-го года пользования–многолетние травы 2-го года пользования–яровая пшеница–занятый пар–озимая рожь	Ячмень с подсевом трав–многолетние травы 1-го года пользования–многолетние травы 2-го года пользования–озимая рожь–яровая пшеница–овес	Ячмень с подсевом трав–многолетние травы 1-го года пользования–многолетние травы 2-го года пользования–озимая пшеница–картофель–яровая пшеница	Картофель–ячмень с подсевом трав–многолетние травы 1-го года пользования–озимая пшеница–зернобобовые–яровая пшеница

Примечание. Нумерация севооборотов та же в табл. 2–5.

боподзолистых легко- и среднесуглинистых почвах Ярославской обл., характеризующихся гидрослюдистым минералогическим составом ила и высокой емкостью катионного обмена 14–24 мг-экв/100 г почвы, по действию куриного помета (КП) содержание аммонийного азота в слое 0–40 см возросло до 4–6 мг/100 г почвы, а степень его перехода в жидкую фазу – до 8.0–22.5%. Но уже при последствии КП эти параметры снизились до 1.46–1.76 мг/100 г почвы и до 2.5–2.7%. При последствии КП урожайность возделываемых культур определялась запасами нитратного азота в слое 0–40 см почвы [8].

На легких дерново-подзолистых почвах Мещеры, в которых ЕКО и содержание физической глины варьировали соответственно от 2.0 до 14.6 мг-экв/100 г почвы и от 1.4 до 22.5%, степень перехода N-NH<sub>4</sub> почвы в жидкую фазу возросла с уменьшением обоих параметров ( $r^2 = 0.907$ ), изменяясь от 7.0 до 22.4% [5, 7].

Цель работы – в многолетнем стационарном комплексном опыте (агроландшафты) оценить роль удобрений, физико-химических и химических свойств, почвенных разностей серых лесных почв на запасы нитратного азота и подвижность аммонийного азота в почве.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование провели на 1-1 культуре 5-й ротации 5-ти шестипольных севооборотов (табл. 1). Опыт заложен в 1996 г. [9]. Дозы удобрений рассчитывали балансовым методом для следующих уровней интенсивности:

1 – нулевой (экстенсивный) – на продуктивность 18–20 ц з.е./га;

2 – поддерживающий (нормальный) – на продуктивность 20–23 ц з.е./га;

3 – интенсивный – на продуктивность 27–35 ц з.е./га;

4 – высокоинтенсивный – на продуктивность 37–45 ц з.е./га или

о/о – без внесения минеральных удобрений, п/ом – поддерживающий органо-минеральный, и/м – интенсивный минеральный, в/м – высокоинтенсивный минеральный, и/ом – интенсивный органо-минеральный, в/ом – высокоинтенсивный органо-минеральный.

Удобрения вносили на фоне 4-х систем обработки: отвальной (вспашка на 20–22 см ежегодно), комбинированно-энергосберегающей (в 2021 г. плоскорезная обработка на 10–12 см), комбинированно-ярусной (в 2021 г. вспашка на 20–22 см), противозероэрозийной (в 2021 г. глубокое рыхление на 25–27 см). Исследования вели и в различных почвенных ареалах.

Опыт закладывали в четырехкратной повторности. Площадь делянки 20 м × 7 м = 140 м<sup>2</sup>. Расположение делянок по блокам и ярусам систематическое.

В результате почвенного обследования в 1-й закладке опыта, проведенного сотрудниками МСХА им. К.А. Тимирязева под руководством В.И. Кирюшина, составлена почвенная карта в масштабе 1 : 200 с выделением 8-ми разностей серых лесных почв, формирующих элементарные почвенные ареалы (ЭПА) разнообразной площади и формы. Выделены следующие почвенные разности: типичные (плакорные) серые лесные, серые лесные слабоподзоленные, серые лесные среднеподзоленные, сильноподзоленные, остаточнок-карбонатные, серые лесные среднеподзоленные со 2-м гумусовым горизонтом (ВГГ), сильноподзоленные со ВГГ, серые лесные грунтово-слабоглееватые почвы.

Дозы удобрений, внесенных под предшествующую культуру (конец 4-й ротации, 2020 г.) и 1-ю

Таблица 2. Схема применения удобрений под предшествующую (6-ю культуру) и 1-ю культуру севооборотов [9, 10]

Параметры использования	Севообороты									
	1. Овес + мн. травы		2. Овес + мн. травы		3. Ячмень + мн. травы		4. Ячмень + мн. травы		5. Картофель	
Уровни интенсивности	Нулевой, о/о	Поддерживающий, п/ом	Поддерживающий, и/ом	Интенсивный, и/м	Интенсивный, и/м	Интенсивный, и/м	Интенсивный, и/м	Интенсивный, и/ом	Интенсивный, и/ом	Высокоинтенсивный, в/ом
Дозы удобрений под предшествующий	Навоз 40 т/га	Навоз 40 т/га + N40	Навоз 40 т/га + N40	Навоз 40 т/га + N40	Навоз 40 т/га + N60	Навоз 40 т/га + N60	Навоз 40 т/га + N60	Навоз 40 т/га + N60	Навоз 40 т/га + N60	Навоз 40 т/га + N60
Дозы удобрений под 1-ю культуру	0	N30P30K30	N30P30K30	N30P30K30	N45P45K45	N45P45K45	N45P45K45	N45P45K45	N90P90K90	N120P120K120

Примечание. Уровни интенсивности: о/о – без внесения минеральных удобрений, п/ом – поддерживающий органико-минеральный, и/м – интенсивный органико-минеральный, в/ом – высокоинтенсивный органико-минеральный, и/ом – высокоинтенсивный органико-минеральный, в/ом – высокоинтенсивный органико-минеральный. То же в табл. 3–5.

культуру 5-й ротации севооборотов, представлены в табл. 2. Почвенные анализы по общепринятым методикам проведены для 3-х почвенных разностей: серые лесные типичные, серые лесные среднеподзоленные, серые лесные среднеподзоленные со ВГГ [10]. Содержание аммонийного азота в водной вытяжке (1 : 1) определяли с помощью ионоселективного электрода на ионы  $\text{NH}_4^+$  [5, 7].

Условия использования севооборотов состояли в том, что с ростом уровня интенсивности севооборота повышались и дозы применения удобрений.

Статистическую обработку данных проводили методом корреляционно-регрессионного анализа с использованием компьютерных программ Microsoft Excel, STAT VIUA.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Погодные условия в 2021 г. характеризовались крайне неравномерным выпадением осадков в течение вегетационного периода, не совпадающим с оптимальной потребностью в них полевых культур, высокими перепадами температур. Весна 2021 г. была затяжной. За апрель выпала почти двойная норма осадков, за май – близкая к норме. Температура в 1-й декаде мая была на 1.1°C более низкой, чем среднемноголетняя норма. Средняя температура воздуха за июнь была на 4°C более высокой, чем среднемноголетняя, что ускоряло развитие растений. Количество осадков было близким к норме. Причем в 3-й декаде их было в 2.3–2.5 раза меньше, чем обычно. За период с 13.06 по 20.07.2021 г. (за 37 сут) выпало всего 12.2 мм. Из них 36% (4.3 мм) являлись малоэффективными. Таким образом, в фазах выхода в трубку и колошения растения испытывали острый дефицит во влаге, что резко снизило урожайность зерновых яровых культур. Выпавшие в 1-й и последующих декадах августа осадки уже заметно не могли повлиять на величину урожая яровых зерновых культур, но усложнили их уборку, заметно ускоряли трансформацию азота почвы и удобрений.

Исследования показали (табл. 3), что при отвальной вспашке на 20–22 см по сравнению с нулевым уровнем интенсификации (1. Овес + травы, о/о) с его повышением до “в/ом” (5. Картофель) в слое 0–60 см почвы запасы N-NO<sub>3</sub> в 1-й срок наблюдений в серой лесной почве возрастали с 10.0 до 85.2 кг/га, в серой лесной среднеподзоленной – с 14.9 до 196 кг/га. В уборку запасы N-NO<sub>3</sub> в вариантах последствия навоза

**Таблица 3.** Влияние уровней интенсификации на запасы нитратного азота в слое 0–60 см в серой лесной и серой лесной средне-оподзоленной почвах в фазе всходов на фоне отвальной вспашки на глубину 20–22 см, кг/га

Слой, см	Севообороты			
	1. Овес + травы	3. Ячмень + травы	4. Ячмень + травы	5. Картофель
	уровни интенсификации			
	о/о	и/м	и/м	в/ом
Серая лесная почва				
0–20	3.2	5.7	15.7	37.8
20–40	3.5	4.9	16.1	28.8
40–60	3.3	4.7	15.1	18.6
Сумма	10.0	15.3	46.9	85.2
Серая лесная средне-оподзоленная почва				
0–20	5.3	10.7	44.3	95.6
20–40	4.9	8.4	14.7	56.2
40–60	4.7	7.1	30.2	44.7
Сумма	14.9	26.2	89.2	196

**Таблица 4.** Влияние уровней интенсификации на запасы нитратного азота в слое 0–60 см серой лесной и серой лесной средне-оподзоленной почвах в фазе уборки на фоне отвальной вспашки на глубину 20–22 см, кг/га

Глубина слоя, см	Севообороты			
	1. Овес + травы	3. Ячмень + травы	4. Ячмень + травы	5. Картофель
	уровни интенсификации			
	о/о	и/м	и/м	в/ом
Серая лесная почва				
0–20	14.7	34.1	20.4	27.5
20–40	9.2	13.0	14.4	12.7
40–60	14.2	10.1	9.8	19.8
Сумма	38.1	57.2	44.6	60.0
Серая лесная средне-оподзоленная почва				
0–20	9.5	20.4	16.1	16.2
20–40	6.3	10.7	11.5	12.7
40–60	7.1	7.7	15.4	8.8
Сумма	22.9	38.8	43.0	37.8

40 (о/о) и N60P60K60 с действием N45P45K45 (и/м, севооборот 3 – ячмень + травы) в обеих почвенных разностях возросли: до 38.1 и 57.2 кг/га в серой лесной почве и до 22.9 и 38.8 кг/га – в серой лесной средне-оподзоленной (табл. 4), что было обусловлено более благоприятными условиями увлажнения и достаточно высокими температурами для процессов нитрификации. В вариантах дальнейшего повышения уровня интенсификации возрастание запасов N-NO<sub>3</sub> в почве в уборку не наблюдали. Полученные результаты в целом совпадали с результатами работ [4–6].

При комбинированно-энергосберегающей системе обработки почвы на серой лесной средне-оподзоленной со ВГГ почве при рыхлении на 10–12 см, когда основная часть внесенных органических удобрений располагалась в верхней части пахотного слоя, интенсивно проходили процессы нитрификации в вариантах последствия навоз 40 т/га и навоз 40 т/га + N60 с действием N45P45K45. Показано, что запасы нитратного азота резко возрастали в оба срока наблюдений (табл. 5). При применении только минеральных удобрений с повышением уровня их применения от уровня и/м (севооборот 3 – ячмень + много-

**Таблица 5.** Влияние уровней интенсификации на запасы нитратного азота в слое 0–60 см серой лесной среднеоподзоленной с ВГГ почвы в фазе всходов и в фазе уборки на фоне комбинированно-энергосберегающей обработки на глубину 10–12 см, кг/га

Глубина слоя, см	Севообороты			
	1. Овес + травы	2. Овес + травы	3. Ячмень + травы	4. Ячмень + травы
	уровни интенсификации			
	о/о	и/ом	в/м	в/м
Серая лесная среднеоподзоленная с ВГГ почва (фаза всходов)				
0–20	14.2	47.4	13.1	28.3
20–40	17.0	93.3	12.1	12.4
40–60	26.3	83.5	10.1	11.5
Сумма	57.5	224.2	35.3	52.2
Серая лесная средне-оподзоленная с ВГГ почва (фаза уборки)				
0–20	34.3	12.4	33.9	86.6
20–40	23.9	109.4	16.4	27.1
40–60	18.6	57.7	9.2	15.4
Сумма	76.8	179.5	59.5	129

**Таблица 6.** Взаимосвязь степени перехода N-NH<sub>4</sub> в жидкую фазу для серых лесных почв ( $W$ , %) Владимирского ополья ландшафтного стационара “Верхневолжский ФАНЦ” с содержанием аммонийного азота в почве ( $x_1$ , мг/100 г почвы), содержанием гумуса ( $x_2$ , %), емкостью катионного обмена ( $x_3$ , мг-экв/100 г почвы) и рН<sub>KCl</sub> ( $x_4$ )

Почва	Уравнение взаимосвязи ( $n = 103$ )	$R^2$	Доверительный интервал
Серая лесная среднесуглинистая	$W_1 = 0.96 - 0.153x_1$	0.100	0.82
	$W_2 = 0.20 + 0.181x_2$	0.343	0.70
	$W_3 = -0.33 + 0.0386x_3$	0.057	0.84
	$W_4 = 0.63 - 0.221x_1 + 0.210x_2$	0.540	0.59
	$W_5 = 6.36 - 0.248x_1 - 1.80x_4 + 0.0518x_2^2 - 0.010x_3^2 + 0.0766x_3x_4$	0.678	0.50

Примечание.  $2.20 > W > 0.06$ ,  $4.24 > x_1 > 0.85$ ,  $5.58 > x_2 > 0.29$ ,  $33 > x_3 > 15.5$ ,  $7.20 > x_4 > 4.85$ . Для всех моделей экспериментальная величина коэффициента Фишера больше теоретической.

летние травы) до уровня в/м (севооборот 4 – ячмень + многолетние травы) запасы N-NO<sub>3</sub> также возрастали с 35.3 до 52.2 в фазе всходов и с 59.5 до 129 кг/га в фазе уборки.

В целом запасы N-NO<sub>3</sub> в слое 0–60 см почвы увеличивались с повышением уровня интенсификации, наиболее высокими они были в серой лесной средне-оподзоленной с ВГГ почве и размещении органических удобрений в верхней части пахотного слоя, благоприятные условия увлажнения после уборки при высоких температурах способствовали более быстрому восстановлению плодородия почвы по величине запасов N-NO<sub>3</sub>.

Так как в почве первым этапом трансформации органического вещества, растительных остатков, внесенных органических удобрений

является аммонификация, с ростом которой повышаются скорость нитрификации и размеры накопления в почве нитратного азота, то на примере почвенных разностей серых лесных почв в опыте была изучена взаимосвязь степени перехода аммонийного азота в жидкую фазу при соотношении почва : вода = 1 : 1 в зависимости от некоторых свойств почвы. Были использованы образцы почвы, отобранные до глубины 100 см на 3-х почвенных разностях (серые лесные, серые лесные средне-оподзоленные, серые лесные средне-оподзоленные с ВГГ), использованных при различных уровнях интенсификации и различавшихся содержанием аммонийного азота, гумуса, емкостью катионного обмена и величиной рН<sub>KCl</sub> (табл. 6).

Степень перехода аммонийного азота в жидкую фазу ( $W$ ) варьировала в узких пределах (от 0.06 до 2.20%), содержание аммонийного азота в почве – от 0.85 до 4.24 мг/100 г почвы, содержание гумуса – от 0.29 до 5.58%, емкость катионного обмена – от 15.5 до 33.0 мг-экв/100 г почвы,  $pH_{KCl}$  – от 4.85 до 7.20 ед.

Установлено, что с увеличением содержания  $N-NH_4$  в почве доля его перехода в жидкую фазу снижалась, что в целом совпадало с законом действующих масс. На влияние этого фактора приходилось около 10.0% вариации степени перехода  $W$ . Доля влияния величины содержания гумуса составила 34.3%, т.е. было в 3.4 раза более высоким. Между этими параметрами наблюдали среднюю степень взаимосвязи. Известно, что соли аммония органических кислот хорошо растворимы в воде и, следовательно, их связь с кислотными группами органического вещества весьма слабая. Слабо влияла на параметр  $W$  и емкость катионного обмена (доля –  $\approx 5.7\%$ ). Без учета взаимодействия факторов степень перехода аммонийного азота почвы в жидкую фазу слабо возрастала.

При учете влияния на показатель  $W$  2-х изученных параметров (содержание аммонийного азота и гумуса в почве) величина  $R^2$  достигала 54.0% (средняя степень взаимосвязи). При этом степень перехода  $W$  снижалась с увеличением содержания аммонийного азота, но увеличивалась с ростом содержания гумуса в почве.

При учете влияния на степень перехода  $W$  всех изученных факторов и их взаимодействий получена высокая степень взаимосвязи ( $R^2 = 0.678$ ). При этом с ростом содержания  $N-NH_4$ , величины ЕКО отмечено уменьшение степени перехода аммонийного азота в жидкую фазу, что совпадало с результатами работ [5–7]. С ростом содержания гумуса степень перехода  $W$  особенно быстро повышалась (выявлена квадратичная зависимость). Этот параметр несколько снижался с ростом  $pH_{KCl}$ , но повышался от взаимодействия показателей ЕКО и  $pH_{KCl}$ .

В работах [4–6] было установлено, что определяющее влияние на продуктивность возделываемых культур оказывали запасы подвижных форм азота, формирующиеся в ранний период их вегетации в слое 0–40 см почвы. Но поглощение азота из почвы отмечено и из слоев глубже 40 см. Поэтому учет содержания подвижных форм азота и свойств почвы более глубоких слоев 0–60 см будет более корректно отражать взаимосвязи между ними. В связи с этим для слоев 0–10, 10–20, 20–40 и 40–60 см серых лесных, серых лесных сред-

не-оподзоленных и серых лесных средне-оподзоленных с ВГГ почв были усреднены данные степени перехода  $N-NH_4$  почвы в жидкую фазу, содержания аммонийного азота, гумуса, ЕКО и величин  $pH_{KCl}$  (табл. 7).

Наиболее высокая доля перехода аммонийного азота в жидкую фазу  $W$  отмечена в серой лесной с ВГГ почве, наиболее низкая – в серой лесной средне-оподзоленной. Однако содержание  $N-NH_4$  в почве было наиболее высоким в последней почвенной разности.

Содержание гумуса и ЕКО снижались от серой лесной средне-оподзоленной с ВГГ почвы к серой лесной и серой лесной средне-оподзоленной.

Наиболее высокие показатели  $pH_{KCl}$  в слое 0–20 см почвы выявлены в серой лесной почве (5.86–6.06 ед.), наиболее низкие (5.37–5.53) – в серой лесной средне-оподзоленной с ВГГ почве. В то же время в слоях 20–40 и 40–60 см почвы в серой лесной средне-оподзоленной почве наблюдали наиболее низкие величины  $pH_{KCl}$  (5.38–5.59 ед.), что было связано с генезисом серых лесных почв (повышенное увлажнение).

Корреляционно-регрессионный анализ взаимосвязи средней степени перехода  $N-NH_4$  почвы в жидкую фазу со средними изученными параметрами (табл. 8) позволил выявить их тесную высокую связь ( $0.877 > R^2 > 0.707$ ).

Коэффициент детерминации для взаимосвязи степени перехода  $W$  с содержанием гумуса составил 70.7% (модель 1). При учете ЕКО и содержания гумуса он повышался до 86.9% (модель 2). При этом с ростом ЕКО в начале наблюдали повышение параметра  $W$ , а затем – снижение. По модели 3 с увеличением содержания аммонийного азота в почве степень перехода  $W$  снижалась по квадратичной зависимости, но повышалась от действия его сочетания с содержанием гумуса. Несколько более тесная взаимосвязь установлена при учете содержания гумуса, величины  $pH_{KCl}$  и сочетания этих параметров (модель 4). При этом с ростом  $pH_{KCl}$  степень перехода  $W$  изменялась, проходя через минимум.

Очевидно, в серых лесных средне-оподзоленных почвах в слоях 20–40 см и 40–60 см почвы при более низких величинах  $pH_{KCl}$  повышался положительный заряд гидроксидов железа и алюминия. Это вело к гетерокоагуляции их с отрицательно заряженными органическими и органоминеральными коллоидами. При этом происходило внутриагрегатное поглощение ионов аммония, переход которых в жидкую фазу замедлялся. Основной же причиной снижения параметра  $W$  в

**Таблица 7.** Свойства почвенных разностей серых лесных почв в слоях в вариантах, различавшихся уровнем интенсификации и системами обработки почвы

Глубина слоя, см	Варианты с разным уровнем интенсификации и системами обработки почвы								Среднее
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Степень перехода N-NH <sub>4</sub> почвы в жидкую фазу в серой лесной почве, %									
0–10	2.08	0.92	1.08	0.70	0.70	1.46	1.15	–	1.06
10–20	0.68	1.06	0.66	0.80	0.93	1.43	1.02	–	0.94
20–40	0.30	0.36	0.38	0.90	0.32	0.40	0.59	–	0.46
40–60	0.48	0.30	0.36	0.36	0.46	0.32	0.41	–	0.38
Степень перехода N-NH <sub>4</sub> почвы в жидкую фазу в серой лесной средне-оподзоленной почве, %									
0–10	0.75	0.80	0.29	0.72	0.44	0.67	0.48	–	0.59
10–20	0.60	0.31	0.21	1.02	0.35	0.48	0.38	–	0.48
20–40	0.18	0.14	0.06	0.20	0.10	0.12	0.21	–	0.14
40–60	0.20	0.20	0.20	0.13	0.14	0.14	0.27	–	0.18
Степень перехода N-NH <sub>4</sub> почвы в жидкую фазу в серой лесной средне-оподзоленной почве с ВГГ, %									
0–10	0.52	1.13	1.76	1.33	0.85	2.20	0.78	0.41	1.12
10–20	0.43	0.79	1.68	0.90	0.99	1.65	0.70	0.61	0.97
20–40	0.19	–	0.69	0.70	0.74	0.84	0.51	0.43	0.59
40–60	0.14	0.99	0.68	0.17	–	0.84	0.62	0.79	0.60
Содержание N-NH <sub>4</sub> в серой лесной почве, мг/100 г почвы									
0–10	1.54	1.99	2.25	3.18	2.90	2.19	1.55	–	2.23
10–20	1.78	1.79	2.44	2.46	3.07	1.62	1.60	–	2.11
20–40	1.40	1.33	1.95	1.70	2.96	1.38	1.13	–	1.69
40–60	1.37	1.32	1.46	1.60	1.44	0.99	1.52	–	1.38
Содержание N-NH <sub>4</sub> в серой лесной средне-оподзоленной почве, мг/100 г почвы									
0–10	1.58	2.78	2.66	2.07	3.82	4.16	4.06	–	3.02
10–20	1.34	3.00	3.85	1.40	3.62	3.32	2.88	–	2.77
20–40	3.19	3.22	3.81	2.76	3.59	3.45	2.69	–	3.24
40–60	2.29	2.78	3.88	3.04	3.17	3.00	2.97	–	3.02
Содержание N-NH <sub>4</sub> в серой лесной средне-оподзоленной почве с ВГГ, мг/100 г почвы									
0–10	3.35	3.11	1.82	2.09	2.27	2.27	2.41	2.80	2.52
10–20	2.59	2.76	1.62	2.46	1.82	2.21	2.50	1.82	2.22
20–40	3.02	2.43	1.35	1.55	1.62	2.54	1.51	1.49	1.94
40–60	4.04	1.10	1.57	1.16	–	1.86	1.32	1.80	1.84
Содержание гумуса в серой лесной почве, %									
0–10	5.42	2.96	4.68	4.05	2.47	3.86	2.60	–	3.72
10–20	3.09	2.73	3.82	3.84	2.49	4.18	1.78	–	3.13
20–40	1.11	0.70	2.71	1.94	1.30	1.40	0.71	–	1.41
40–60	0.98	0.54	1.22	0.84	1.11	0.98	0.89	–	0.94
Содержание гумуса в серой лесной средне-оподзоленной почве, %									
0–10	2.79	3.94	2.98	3.05	3.03	2.87	3.14	–	3.11
10–20	1.19	3.76	2.68	3.10	3.10	2.65	3.14	–	2.80
20–40	0.83	1.49	1.09	1.98	1.64	1.43	1.42	–	1.41
40–60	0.57	0.80	1.10	1.12	1.16	0.97	1.08	–	0.97
Содержание гумуса в серой лесной средне-оподзоленной почве с ВГГ, %									
0–10	3.82	3.89	3.00	3.18	4.70	5.58	3.99	3.82	4.00



Таблица 7. Окончание

Глубина слоя, см	Варианты с разными уровнем интенсификации и системами обработки почвы								Среднее
	1	2	3	4	5	6	7	8	
10–20	4.00	4.13	3.25	3.43	3.61	4.80	3.88	3.94	3.88
20–40	4.94	4.35	3.69	2.82	4.08	3.99	2.41	3.20	3.68
40–60	2.66	2.35	1.25	1.17	—	1.91	1.35	2.11	1.83
ЕКО в серой лесной почве, мг-экв/100 г почвы									
0–10		20.5	26.8	15.5	22.6	27.6	24.0	—	23.1
10–20	26.2	24.8	27.2	27.9	25.1	27.7	22.5	—	25.9
20–40	27.1	26.6	25.8	24.6	25.6	22.4	23.0	—	25.0
40–60	26.0	25.6	27.7	27.4	25.0	22.8	20.9	—	25.1
ЕКО в серой лесной средне-оподзоленной почве, мг-экв/100 г почвы									
0–10	23.7	25.6	21.8	23.4	23.7	23.0	24.6	—	23.7
10–20	23.3	25.4	21.5	23.3	21.8	21.5	23.4	—	22.9
20–40	24.3	18.4	20.3	22.0	22.1	22.8	20.5	—	21.5
40–60	24.6	19.5	20.4	23.1	21.6	22.8	22.9	—	22.1
ЕКО в серой лесной средне-оподзоленной почве с ВГГ, мг-экв/100 г почвы									
0–10	26.0	26.2	23.0	23.9	26.9	27.6	25.4	26.9	25.7
10–20	27.7	26.4	23.4	24.3	26.6	27.2	24.8	28.1	26.1
20–40	33.0	25.9	27.6	23.2	30.0	27.4	23.6	27.2	27.2
40–60	23.9	27.6	20.9	21.1	—	22.5	23.1	24.4	23.4
pH <sub>KCl</sub> в серой лесной почве									
0–10	5.81	5.35	5.41	6.17	7.20	6.40	6.10	—	6.06
10–20	5.65	5.53	5.32	6.19	6.38	6.09	5.90	—	5.86
20–40	5.28	5.37	5.55	5.86	6.35	6.18	5.68	—	5.75
40–60	5.44	5.47	5.37	5.60	6.37	5.98	5.55	—	5.68
pH <sub>KCl</sub> в серой лесной средне-оподзоленной почве									
0–10	5.87	5.91	5.67	5.35	5.19	5.86	5.69	—	5.65
10–20	5.97	5.90	5.61	5.49	5.12	5.93	5.49	—	5.64
20–40	5.48	5.70	5.19	5.30	5.78	6.13	5.56	—	5.59
40–60	5.53	5.24	4.92	5.18	5.62	5.83	5.38	—	5.38
pH <sub>KCl</sub> в серой лесной средне-оподзоленной почве с ВГГ									
0–10	5.22	4.97	4.99	5.28	5.39	6.41	5.34	5.39	5.37
10–20	5.81	4.91	5.13	5.27	6.03	6.12	5.44	5.50	5.53
20–40	5.96	5.35	5.58	5.80	5.90	5.96	5.53	5.66	5.72
40–60	5.62	5.27	5.19	6.47	—	5.56	5.22	5.33	5.52

более глубоких слоях этой почвы являлось снижение микробиологической активности, особенно процессов нитрификации, из-за повышения кислотности. Это подтверждало наиболее высокое содержание аммонийного азота в слоях 20–40 и 40–60 см почвы (табл. 7).

В табл. 9 проведено сравнение экспериментально полученных средних величин перехода аммонийного азота в жидкую фазу (вытяжка почва : вода = 1 : 1) с рассчитанными по моделям 1–4

(табл. 8) величинами. Получено удовлетворительное соответствие между ними.

В острозасушливом 2021 г. погодные условия оказали определяющее отрицательное влияние на урожайность яровых зерновых культур [11]. Дефицит влаги в период колошения–формирование зерна снизил их урожайность (ц зерна/га), которая составила: овса – 21.9–25.6, ячменя – 13.2–15.0. Достоверных различий влияния удоб-

**Таблица 8.** Взаимосвязь степени перехода N-NH<sub>4</sub> в жидкую фазу для серых лесных почв (*W*, %) Владимирского ополья ландшафтного стационара “Верхневолжский ФАНЦ” с содержанием аммонийного азота в почве (*x*<sub>1</sub>, мг/100 г почвы), содержанием гумуса (*x*<sub>2</sub>, %), емкостью катионного обмена (*x*<sub>3</sub>, мг-экв/100 г почвы) и рН<sub>KCl</sub> (*x*<sub>4</sub>)

Почва	Уравнение взаимосвязи ( <i>n</i> = 12)	<i>R</i> <sup>2</sup>	Доверительный интервал
Серая лесная средне-суглинистая	$W_1 = 0.0273 + 0.231x_2$	0.707	0.37
	$W_2 = -26.2 + 2.17x_3 + 0.0455x_2^2 - 0.0443x_3^2$	0.869	0.28
	$W_3 = 0.45 - 0.71x_1^2 + 0.096x_1x_2$	0.813	0.31
	$W_4 = 94.6 + 3.54x_2 - 35.3x_4 + 3.29x_4^2 - 0.60x_2x_4$	0.877	0.29

Примечание.  $1.12 > W > 0.14$ ,  $3.24 > x_1 > 1.38$ ,  $4.0 > x_2 > 0.94$ ,  $27.2 > x_3 > 21.5$ ,  $6.06 > x_4 > 5.38$ .

**Таблица 9.** Взаимосвязь средней степени перехода N-NH<sub>4</sub> почвы в жидкую фазу (*W*, %) с его средним содержанием в почве (*x*<sub>1</sub>, мг/100 г), средним содержанием гумуса (*x*<sub>2</sub>, %) и средними величинами ЕКО (*x*<sub>3</sub>, мг-экв/100 г почвы) и рН<sub>KCl</sub> (*x*<sub>4</sub>)

Глубина слоя, см	<i>W</i>	N-NH <sub>4</sub>	Гумус	ЕКО	рН <sub>KCl</sub>	<i>W</i> в зависимости от модели				Среднее
						<i>W</i> <sub>1</sub>	<i>W</i> <sub>2</sub>	<i>W</i> <sub>3</sub>	<i>W</i> <sub>4</sub>	
Серая лесная почва										
0–10	1.06	2.23	3.72	23.1	6.06	0.89	0.94	0.89	1.10	0.96
10–20	0.94	2.11	3.13	25.9	5.86	0.75	0.75	0.77	0.76	0.76
20–40	0.46	1.69	1.41	25.0	5.75	0.35	0.47	0.48	0.50	0.45
40–60	0.38	1.38	0.94	25.1	5.68	0.24	0.41	0.44	0.34	0.36
Серая лесная средне-оподзоленная почва										
0–10	0.59	3.20	3.11	23.7	5.65	0.75	0.80	0.70	0.62	0.72
10–20	0.48	2.77	2.81	22.9	5.64	0.67	0.64	0.65	0.57	0.63
20–40	0.14	3.24	1.41	21.5	5.59	0.35	0.09	0.15	0.32	0.23
40–60	0.18	3.02	0.97	22.1	5.38	0.25	0.18	0.09	0.20	0.18
Серая лесная средне-оподзоленная с ВГТ почва										
0–10	1.12	2.52	4.00	25.7	5.37	0.95	1.05	0.97	1.16	1.03
10–20	0.92	2.22	3.88	26.1	5.53	0.92	0.96	0.93	0.84	0.91
20–40	0.59	1.94	3.68	27.2	5.72	0.88	0.68	0.87	0.69	0.78
40–60	0.60	1.84	1.83	23.4	5.52	0.45	0.49	0.53	0.38	0.46
Доверительный интервал	–	–	–	–	–	0.37	0.28	0.31	0.29	0.31

рений и систем обработок на этот параметр не установлено.

Регулярно выпадающие по декадам августа осадки [11] позволили получить урожай клубней картофеля при интенсивном уровне применения удобрений в размере 259–281, при высокоинтенсивном – 264–284 ц/га. Очевидно, примененные дозы удобрений (табл. 2) повышали запасы нитратного азота (табл. 3) в слое 0–60 см почвы до

85.2–196 кг/га и обеспечивали получение высоких урожаев этой культуры. При этом нужно отметить, что увеличение дозы полного минерального удобрения с N90P90K90 до N120P120K120 не вело к достоверному росту урожайности картофеля. Для серых лесных почв Ополья это наблюдали и в других исследованиях [12].

В вариантах, где под картофель применяли зяблевую вспашку на 20–22 см (системы отваль-

ной и комбинированно-ярусной обработки) урожайность картофеля была достоверно больше (283 и 280 ц/га соответственно), чем при комбинированно-энергосберегающей (265 ц/га) и противоэрозионной (262 ц/га) системах обработки ( $HCP_{05} = 13$  ц/га). По-видимому, при вспашке формировались более благоприятные агрофизические свойства пахотного слоя и его водно-воздушный режим.

## ВЫВОДЫ

1. Обобщены литературные данные о влиянии подвижных форм азота на продуктивность культур севооборотов на серых лесных почвах Владимирского ополья и дерново-подзолистых почвах разного физико-химического состояния. На легко- и средне-суглинистых почвах, характеризующихся высокой емкостью катионного обмена, определяющая роль в повышении урожайности культур севооборота принадлежала запасам нитратного азота, в меньшей мере (в 2–3 раза) – запасам аммонийного азота в слое 0–40 см почвы в ранний период их вегетации. Это было связано с полным нахождением нитратного азота в жидкой фазе, аммонийного – с частичным. С облегчением гранулометрического состава и уменьшением емкости катионного обмена переход  $N-NH_4$  почвы в жидкую фазу значительно повышался, для диагностики минерального питания растений азотом можно использовать запасы его аммонийной и нитратной форм.

2. В многолетнем стационарном опыте “агрландшафты” подтверждено влияние внесенных минеральных азотных и органических удобрений, повышавшее запасы  $N-NO_3$  в почве, выявлены различия в запасах нитратного азота в различных почвенных разностях серых лесных почв и в вариантах систем их обработки.

3. Для первого этапа трансформации удобрений (аммонификации), влияющего на дальнейшие процессы нитрификации, установлены факторы как повышения, так и снижения степени перехода аммонийного азота почвы в жидкую фазу ( $W$ ). Этот параметр возрастал с увеличением содержания гумуса и уменьшался с ростом содержания в почве аммонийного азота. С повышением емкости катионного обмена в начале наблюдали рост параметра  $W$ , затем – его снижение. В начальной области увеличения  $pH_{KCl}$  происходило снижение степени перехода аммонийного азота в жидкую фазу, в дальнейшем – ее возрастание. Наиболее заметным влияние величины  $pH_{KCl}$  на изученный параметр было характерно для серой лесной средне-оподзоленной почвы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ненайденко Г.Н.* Рациональное применение удобрений в условиях рыночной экономики. Иваново, 2007. 350 с.
2. *Сычёв В.Г., Шафран С.А.* Агрохимические свойства почв и эффективность минеральных удобрений. М.: ВНИИА, 2013. 296 с.
3. *Лукин С.М.* Длительные стационарные полевые опыты с органическими удобрениями: значение, результаты и перспективы исследований на дерново-подзолистых почвах // Мат-лы Международ. научн. конф., посвящ. 90-летию ВНИИ агрохимии и 80-летию Географической сети опытов с удобрениями (1–2 декабря 2021 г.) / Под ред. Шкуркина С.И. М.: ВНИИА, 2022. С. 107–116.
4. *Окорков В.В., Фёнова О.А., Окоркова Л.А.* Приемы комплексного использования средств химизации в севообороте на серых лесных почвах Верхневолжья в агротехнологиях различной интенсивности. Суздаль, 2017. 176 с.
5. *Окорков В.В., Фёнова О.А., Окоркова Л.А.* Серые лесные почвы Владимирского ополья и эффективность использования их ресурсного потенциала. Иваново: ПресСто, 2021. 188 с.
6. *Окорков В.В.* К вопросу о равноценности питания растений нитратным и аммонийным азотом // Агрохимия. 2021. № 12. С. 3–14.
7. *Окорков В.В.* Различия в использовании растениями нитратного и аммонийного азота почвы // Проблемы и вопросы современной науки. Реценз. сб. научн. тр. 2019. № 2(3). Ч. 1. НИЦ МОАН, 2019. С. 66–76.
8. *Okorkov V.V., Okorkova L.A., Shchukin N.N.* Chicken droppings influence on sod-podzolic soil fertility change studying experience // In the scientific collection IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Series “Advances in Science for Agriculture “Achievements of Science for the Agro-Industrial Complex”. 2021. P. 012062. Nemchinovka. <https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/843/1>
9. *Окорков В.В., Григорьев А.А., Фёнова О.А., Окоркова Л.А.* Приемы применения агрохимических средств на землях с неоднородным почвенным покровом во Владимирском ополье. Владимир: ВО-ОО ВОИ ПУ “Рост”, 2010. 188 с.
10. Практикум по агрохимии / Под ред. Ягодина Б.А. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
11. *Корчагин А.А., Лебедева А.Г., Шукин И.М., Шаркевич В.В., Шукина В.И.* Особенности формирования урожайности яровых зерновых культур и картофеля в погодных условиях 2021 года // Владимир. земледелец. 2022. № 1(99). С. 15–20.
12. *Окорков В.В.* Эффективность систем удобрения под картофель на серых лесных почвах Владимирского ополья // Агрохимия. 2005. № 3. С. 36–43.

## Changes in the Content of Mobile Forms of Nitrogen in Gray Forest Soils of Opole under the Influence of Landscape Features of Agricultural Technologies

V. V. Okorkov<sup>a,#</sup>, I. M. Shchukin<sup>a</sup>, L. A. Okorkova<sup>a</sup>,  
V. I. Shchukina<sup>a</sup>, and A. A. Kozlov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Upper Volga Federal Agrarian Scientific Center  
p. Novy, Suzdal district, Vladimir region 601261, Russia

<sup>#</sup>E-mail: okorkovvv@yandex.ru

In a long-term stationary experiment on gray forest soils of the Vladimir Opole, the influence of agricultural technologies of cultivation of field crops on the content of mobile forms of nitrogen, their relationship with chemical and physico-chemical properties of the soil, levels of intensification has been studied. After a long-term application of agricultural technologies with an increase in the level of fertilizer application, an increase in nitrate nitrogen reserves, the degree of transition of ammonium nitrogen of the soil to the liquid phase from the humus content at the level of a strong relationship was revealed. The content of N-NH<sub>4</sub> in the soil reduced its value. With an increase in the capacity of cation exchange, the value of this parameter changed, passing through the maximum, pH<sub>KCl</sub> – through the minimum. Changes in the humus content and physico-chemical properties of soil differences of gray forest soils have been established: gray forest plakornaya, gray forest medium-saline, gray forest medium-saline with a second humus horizon.

*Key words:* gray forest soils, Vladimir opole, humus content, physico-chemical properties, nitrate nitrogen reserves, the degree of transition of ammonium nitrogen to the liquid phase, correlation and regression analysis.