

УДК 631:811:631.813:631.84:631.862.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АГРОКЛИМАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ ВЕРХНЕВОЛЖЬЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

© 2021 г. В. В. Окорков^{1,*}, О. А. Фенова¹, Л. А. Окоркова¹

¹ Верхневолжский федеральный аграрный научный центр
601261 Владимирская обл., Суздальский р-н, пос. Новый, Россия

*E-mail: okorkovvv@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.12.2020 г.

После доработки 04.01.2021 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

В продолжающемся длительном стационарном опыте на серых лесных почвах Верхневолжья в 4-й ротации 7-польного севооборота исследовали влияния систем удобрения на урожайность возделываемых культур и продуктивность севооборота. Получены новые данные действия минеральных и последствие органических удобрений на эти показатели. Повышающее продуктивность севооборота влияние удобрений лимитировалось размерами использования культурами влаги, иногда — и фотосинтетической активной радиации. Впервые приведены количественные данные влияния азота органических и минеральных удобрений на накопление нитратного азота в ранние сроки вегетации культур, их определяющую роль в повышении их урожайности. Они объясняют более высокую роль азота органических удобрений по сравнению с азотом минеральных в поддержании и улучшении гумусового состояния серых лесных почв Верхневолжья, формирование пула экстра-азота при применении высоких доз минеральных удобрений.

Ключевые слова: серые лесные почвы, Верхневолжье, стационарный полевой опыт, органические и минеральные удобрения, урожайность, продуктивность, севооборот.

DOI: 10.31857/S0002188121040128

ВВЕДЕНИЕ

Верхневолжский регион — составная часть Центрального экономического района России. В нем находится >30% пашни. Ее площадь составляет 4402.6 тыс. га, сенокосов — 1445, пастбищ — 1354.2 тыс. га [1].

Дерново-подзолистые почвы Верхневолжья имеют сильно варьирующую кислотность (pH_{KCl} 4.0–6.0), в подпахотных горизонтах высокое содержание обменного алюминия. Преобладает степень насыщенности основаниями 43–75%, содержание гумуса меняется в пределах 0.8–1.8%. Они недостаточно обеспечены подвижными соединениями азота и фосфора, обменным калием и доступными растениям формами микроэлементов.

По степени оподзоленности преобладают сильноподзолистые почвы (42%). В основе повышения их плодородия лежит химическая мелиорация и применение удобрений. Гранулометрический состав представлен удобными для обработки средними (30%) и легкими (25%) суглинками, а также

супесями (34%). Остальные площади примерно наполовину занимают песчаные и тяжелосуглинистые почвы.

Среди типичных подзолистых почв в Верхневолжье имеются островки темноцветных почв, сходных по своим признакам с зональными серыми лесными почвами, так называемые почвы ополей. Они занимают площадь 830 тыс. га, в том числе 305 тыс. га пашни (6.9% площади пашни региона). Это уникальное природное образование составляет значительную часть пашни (33%) Владимирской обл. [2]. В последние годы на них получают >70% валовой сельскохозяйственной продукции. Эти почвы встречаются в Ивановской и Ярославской обл. [1] в виде отдельных включений в дерново-подзолистые почвы.

Распаханные серые лесные почвы имеют значительный обрабатываемый горизонт (25–30 см), более высокое содержание гумуса (2.3–4.5%), меньшую кислотность (pH_{KCl} 5.2–6.5). Они нередко богаты карбонатами и отличаются высокой степенью насыщенности основаниями (75–95%),

а также лучше обеспечены азотом и зольными элементами [3]. По всему почвенному профилю в них отсутствует обменный алюминий в количествах, токсичных для корневых систем возделываемых культур [4, 5]. В силу особенностей минералогического состава [2] и более высокого содержания гумуса (по сравнению с дерново-подзолистыми почвами) серые лесные почвы имеют емкость поглощения 15–33 мг-экв/100 г почвы.

На дерново-подзолистых почвах Центрально-го региона [1, 6, 7] выявлена решающая роль азотных удобрений в повышении продуктивности возделываемых полевых культур. Азотные удобрения и навоз оказывали главенствующее влияние на продуктивность 8- и 7-польных севооборотов на серых лесных почвах Верхневолжья [2, 8–11], в которых изучали и взаимосвязь продуктивности севооборотов с изменением агрохимических свойств почв при применении удобрений. В этих исследованиях установлено, что средняя ежегодная продуктивность изученных севооборотов при тесной степенной или гиперболической зависимостям увеличивалась с ростом запасов нитратного азота в слое 0–40 см почвы (в ранние периоды вегетации культур), которые представляли основу мобильного фонда азота. Последний оценивали по сумме запасов нитратного и аммонийного азота, находящегося в жидкой фазе почвы в слое 0–40 см. Считали, что нитратный азот полностью находится в жидкой фазе, аммонийный – частично. В то же время лишь в работе [12] выявили связь запасов нитратного азота и его мобильного фонда с продуктивностью зерновой культуры (овса).

Недостаточно исследований и многолетней динамики запасов аммонийного азота в изученных почвах. В работе [13] показано, что за период интенсивной химизации в серых лесных почвах ополья резко возросло содержание N-NH₄. Например, в слое почвы 0–40 см его запасы еще в течение 1992–2008 гг. сохранялись на высоком уровне (174–201 кг/га). Снижение их во 2-й срок наблюдений (середина вегетации возделываемых культур) по сравнению с 1-м (всходы яровых, отрастание трав и озимых) в среднем в ротации в вариантах опыта варьировало от 13 до 29 кг/га (среднее = 21 кг/га). В 3-й ротации 7-польного севооборота (2007–2015 гг.) запасы аммонийного азота в слое 0–40 см почвы по сравнению с 1-й и 2-й ротациями снизились со 174–201 до 96–127 кг/га, а соответствующие размеры их снижения во 2-й срок наблюдений по сравнению с 1-м менялись от 8 до 33 кг/га (среднее = 18) [9]. В 3-й и 4-й ротациях произошло уменьшение доли перехода N-NH₄

почвы в жидкую фазу с 4.6 до 2.5–2.2% [13]. Это свидетельствовало о заметном снижении участия запасов аммонийного азота, сформировавшихся в ранний период вегетации культур, в их питании. Поэтому основную роль в питании растений азотом в 4-й ротации должны были играть запасы нитратного азота. Из-за этого размеры мобильного фонда азота в продолжавшемся длительном опыте в 4-й ротации оценивали лишь по запасам нитратного азота.

Установленной нами гиперболической или степенной зависимости средней продуктивности изученных севооборотов [2, 8–11] от мобильного фонда азота или запасов N-NO₃ не было дано достаточно корректного объяснения.

Цель работы – в 4-й ротации 7-польного зернотравяного севооборота длительного полевого опыта на серых лесных почвах Верхневолжья оценить влияние различных систем удобрения на продуктивность культур севооборота, динамику запасов нитратного и аммонийного азота в почве, взаимосвязь продуктивности культур с использованием фотосинтетической активной радиации и выпадающих осадков при применении удобрений.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В 4-й ротации 7-польного севооборота в длительном полевом опыте на серых лесных почвах [2] исследования проводили в следующих вариантах: 1 – занятой пар (викоовсяная смесь), 2 – озимая (яровая) пшеница, 3 – овес с подсевом трав (клевер + тимофеевка), 4 – травы 1-го года пользования, 5 – травы 2-го года пользования, 6 – яровая пшеница, 7 – ячмень. Повторность опыта трехкратная, площадь делянки 100 м² (5 м × 20 м). Размещение делянок рендомизированное.

В начале 1-й ротации (1991–1993 гг.) провели известкование по полной гидролитической кислотности. Во 2-й, 3-й и 4-й ротациях исследования вели при последствии известкования. На его фоне во всех ротациях изучали влияние доз подстилочного навоза КРС (0, 40, 60 и 80 т/га), вносимых после уборки занятого пара, и ежегодного применения минеральных удобрений на урожайность культур севооборота, использование ими выпадающих осадков, изменение агрохимических свойств серых лесных почв. В опыте был абсолютный контроль.

В 4-й ротации 7-польного севооборота под однолетние травы в варианте одинарная доза полного минерального удобрения вносили только N_{aa} 60, в варианте двойной дозы NPK – то же удобрение в дозе N75. Под зерновые культуры и травы

1-го и 2-го года пользования в качестве одинарных доз использовали P40K40 и N40P40K40. Под травы 1-го года пользования во всех ротациях в качестве двойной дозы использовали N40P80K80. Применяли N_{aa} , P_{cd} (P_c) и K_x . Фосфорно-калийные удобрения вносили осенью под основную обработку почвы, азотные — весной под предпосевную культивацию под однолетние травы и яровые зерновые, а также в подкормку озимых и многолетних трав. Фосфорно-калийные удобрения под травы 1-го года пользования вносили поверхностно после уборки покровной культуры, под травы 2-го года пользования — осенью поверхностно после уборки трав 1-го года пользования.

Перед закладкой опыта сумма поглощенных оснований варьировала от 22.0 до 22.6, гидролитическая кислотность — от 3.2 до 4.6 мг-экв/100 г почвы, степень насыщенности основаниями — от 83 до 87%. Почва характеризовалась незначительной обменной кислотностью (0.09–0.13 мг-экв/100 г почвы). Низкие величины обменной кислотности и отсутствие обменного алюминия как в пахотном, так и подпахотном горизонтах, не оказывали отрицательного влияния на возделываемые культуры, в поисках влаги не препятствовали проникновению их корневых систем в подпахотные горизонты. Обеспеченность подвижным фосфором (по Кирсанову) была повышенная или высокая, обменным калием (по Масловой) — такая же [2].

Во всех 4-х ротациях солому зерновых культур при сплошной уборке комбайном (после учета урожайности) измельчали и запахивали. Солому овса просто измельчали.

Агрохимические анализы почвы и растений выполняли по методикам, изложенным в работе [14]. Подвижный фосфор в почве определяли по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО, обменный калий — по методу Масловой, нитратный азот — потенциометрическим методом с помощью ионоселективного электрода на нитраты, аммонийный азот — фотоколориметрическим методом в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26489). Статистическую обработку результатов проводили с использованием программ STAT VIUA и EXCEL.

С учетом соотношения зерна и соломы, количества оставленных в почве пожнивных-корневых остатков [15, 16], как в работе [17], проводили расчет коэффициента использования фотосинтетической активной радиации для условий Владимирского ополья.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены данные влияния удобрений на продуктивность культур севооборота в 4-й ротации. Урожайность викоовсяной смеси (ц з.е./га) изменялась от 18.0 (абсолютный контроль) и 19.0 ц/га (фон известкования) до 27.3 ц з.е./га в варианте последействия навоза 80 т/га (3-я ротация) и применения $N_{aa}75$. Последействие фосфорно-калийных удобрений, внесенных в 3-й ротации, по сравнению с фоном известкования достоверно повысило урожайность на 2.4 ц з.е./га, а последействие доз NPK, также внесенных в 3-й ротации, и действие азотных удобрений в 4-й ротации более значимо повышало урожайность этих культур (до 25.4–25.7 ц з.е./га). Дальнейшего роста урожайности этих культур от последействия навоза и действия азотных удобрений по сравнению с одним их действием и последействием NPK (сравнение вариантов 10 и 11, 13 и 14, 16 и 17 по сравнению с вариантами 4 и 5) не установлено. Хотя от последействия навоза 60 и 80 т/га урожайность однолетних трав возрастала с 19.0 до 21.8–22.5 ц з.е./га.

Максимальная урожайность однолетних трав (33.3 ц з.е./га) была достигнута в 2016 г. В этом году отмечено высокое количество выпавших осадков зимнего и ранневесеннего периодов (298 мм, что на 93 мм больше среднемноголетних) и 133 мм в вегетационный период (среднемноголетнее — 121 мм). Летний период характеризовался высокой суммой температур $>10^{\circ}\text{C}$ (2347 $^{\circ}\text{C}$ при средней многолетней 2077 $^{\circ}\text{C}$) [2, с. 9, 11]. Использование фотосинтетической активной радиации (ФАР) при максимальной урожайности трав составило 3.4%.

Средняя урожайность озимой (2015–2016 гг.) и яровой (2017 г.) пшеницы в контроле и на фоне известкования составила 44.0 и 44.5 ц/га зерна (различия в урожайности озимой и яровой пшеницы в эти годы были невысокими). Не установлено достоверного увеличения урожайности этих культур от фосфорно-калийных удобрений. Резко возросла она от применения N40P40K40 (с 44.5 до 62.3 ц/га). Сочетание этой дозы полного минерального удобрения с навозом 40 и 60 т/га достоверно не повысило урожайность пшеницы, хотя сочетание этой дозы с навозом 80 т/га увеличило ее на 5.0 ц/га. От двойной дозы N80P80K80 по сравнению с одинарной наблюдали достоверный рост урожайности зерна пшеницы 4.5 ц/га, а ее сочетание с дозами навоза не привело к дальнейшему достоверному росту.

Максимальная урожайность зерна озимой пшеницы 72.6 ц/га получена в 2016 г., когда расте-

Таблица 1. Продуктивность культур 7-польного севооборота в 4-й ротации, ц з.е./га

Вариант	Викоовая смесь, 2014–2016 гг.	Пшеница, 2015–2017 гг.	Овес, 2016–2018 гг.	Травы 1-го года пользования, 2017–2019 гг.	Травы 2-го года пользования, 2018–2020 гг.	Яровая пшеница, 2019–2020 гг.	Ячмень, 2020 г.	Средняя продуктивность, 2014–2020 гг.
1. Контроль	18.0	44.0	29.5	50.0	24.8	33.5	42.2	34.6
2. Известкование	19.0	44.5	29.8	50.2	24.8	33.8	41.2	34.8
3. P240K240	21.4	46.9	31.6	54.6	26.0	34.7	46.6	37.4
4. N300P240K240	25.4	62.3	40.5	50.1	32.1	40.4	51.2	43.1
5. N515P480K480	25.7	66.8	41.4	48.2	36.5	42.4	56.1	45.3
6. Навоз 40 т/га	21.0	53.4	32.3	55.1	27.6	37.2	47.2	39.1
7. Навоз 60 т/га	21.8	54.8	34.4	54.4	28.5	38.4	47.3	39.9
8. Навоз 80 т/га	22.5	54.1	36.5	52.7	30.5	39.1	48.8	40.6
9. Нав40 + P240K240	21.8	52.9	32.8	55.0	28.7	40.2	47.6	39.9
10. Нав40 + Нав300P240K240	25.1	64.5	41.8	52.6	34.8	42.4	54.6	45.1
11. Нав40 + N515P480K480	26.8	68.8	43.5	52.5	38.1	42.6	56.9	47.0
12. Нав60 + P240K240	21.7	54.5	35.8	53.9	28.8	40.8	48.8	40.6
13. Нав60 + N300P240K240	26.1	65.6	41.5	54.1	34.1	43.0	61.2	46.5
14. Нав60 + N515P480K480	26.8	66.7	42.9	50.2	37.5	44.6	58.4	46.7
15. Нав80 + P240K240	22.5	58.2	38.7	55.0	29.9	39.1	50.6	42.0
16. Нав80 + N300P240K240	26.6	67.3	42.7	53.5	35.5	42.8	58.7	46.7
17. Нав80 + N515P480K480	27.3	68.9	43.6	49.1	39.2	44.4	61.1	47.7
<i>HCP</i> ₀₅ , ц з.е./га	2.1	3.8	2.5	3.3	2.0	2.6	4.0	2.9
<i>T</i> , %	3.11	2.35	2.29	2.24	2.45	2.37	2.72	2.50
Максимальная урожайность/год	<u>33.3</u>	<u>72.6</u>	<u>52.6</u>	<u>69.5</u>	<u>42.9</u>	<u>44.8</u>	<u>61.2</u>	–
	2016	2016	2017	2017	2020	2019	2020	
Максимальное использование ФАР, %	3.4	3.8	3.2	3.3	3.7	2.2	3.0	–

Примечания. 1. Нав – навоз, т/га. То же в табл. 4–8. 2. Нумерация вариантов та же в табл. 5, 8.

ния этой культуры были хорошо обеспечены теплом и влагой. Использование ФАР достигло 3.8%.

Урожайность овса в контроле и на фоне известкования за 2016–2018 гг. составила 29.5 и 29.8 ц з.е./га или 36.9 и 37.2 ц зерна/га. Определяющее влияние на нее оказало действие полного минерального удобрения и последствие навоза. По сравнению с фоном известкования применение одинарной и двойной доз NPK повышало урожайность овса с 29.8 до 40.5–41.4 ц з.е./га, последствие доз навоза – до 32.3–36.5 ц з.е./га. Достоверного преимущества дозы N80P80K80 по сравнению с дозой N40P40K40 не установлено. При последствии навоза 80 т/га урожайность овса была более высокой по сравнению с последствием дозы навоза 40 т/га. Не получено достоверных преимуществ сочетания последей-

ствия органических удобрений с NPK по сравнению с действием одних последних.

Наиболее высокая урожайность зерна овса 65.8 ц/га (52.6 ц з.е./га) получена в 2017 г., когда за вегетационный период выпало 347 мм осадков (51.6% годовых) и сумма активных температур составила 1835°C (ГТК = 1.79) [9]. Это свидетельствовало об определяющем влиянии условий увлажнения и удобрений на продуктивность этой культуры. При максимальной урожайности зерна овса (65.8 ц/га) коэффициент использования ФАР равнялся 3.2%.

Максимальная продуктивность трав 1-го года пользования установлена при применении фосфорно-калийных и последствии органических (40–60 т/га) удобрений (54.4–55.1 ц з.е./га), сочетания фосфорно-калийных удобрений с органическими (53.9–55.0 ц з.е./га). По сравнению с

контролем и фоном известкования эти системы удобрения достоверно повышали урожайность, а от применения NPK и сочетания их с навозом достоверного роста продуктивности трав не выявлено. Лишь в вариантах сочетания одинарной дозы NPK с органическими удобрениями 60–80 т/га по сравнению с контролем и фоном известкования прибавка урожайности превысила величину HCP_{05} или была ей равна.

Следует отметить, что на серых лесных почвах Верхневолжья на урожайность трав 1-го года пользования оказывало влияние последствие ранее внесенных азотных удобрений (сравнение вариантов 13 и 14, 16 и 17).

В 2017 г., когда за вегетационный период выпало 347 мм осадков при величине ГТК 1.79, была получена максимальная урожайность трав (69.5 ц з.е./га или сена 139 ц/га) при использовании ФАР 3.3%.

Продуктивность трав 2-го года пользования достоверно повышалась от применения полного минерального удобрения и последствия навоза. С ростом доз NPK наблюдали достоверное увеличение их урожайности. Максимальная урожайность трав 2-го года пользования 42.9 ц з.е./га (сена 85.8 ц/га) получена в 2020 г., когда за период их вегетации (3-я декада апреля–июнь) выпало 124.5 мм осадков (при среднемноголетней норме 121 мм). Осадки выпадали относительно равномерно в течение вегетации, длительных засушливых условий не отмечено. Использование ФАР достигло 3.7%.

Урожайность зерна яровой пшеницы в зависимости от систем удобрения в среднем за 2019–2020 гг. варьировала от 33.5 до 44.6 ц/га. Определяющее влияние на нее оказало последствие органических и действие азота минеральных удобрений. Максимальная урожайность зерна (44.8 ц/га) была получена в 2019 г. при использовании 2.2% ФАР. В 2020 г., который был более благоприятным по увлажнению, из-за поражения посевов желтой ржавчиной, широко распространенной в южных регионах европейской части РФ и появившейся в последнее время в ее северных, урожайность культуры при последствии органических удобрений в сочетании с NPK снижалась на 6–8 ц/га. Это было рассчитано по отношению использованной культурой влаги в 2020 г. к коэффициенту водопотребления, установленному в 2019 г.

Урожайность зерна замыкающей 7-польный севооборот культуры ячменя менялась от 41.2 до 61.2 ц/га. Прибавка от удобрений достигала 48.5%. На урожайность культуры влияли фосфорно-калийные, азотные в составе NPK и последствие

органических удобрений. Сочетание фосфорно-калийных удобрений с последствием органических по сравнению с последними не приводило к дальнейшему достоверному росту урожайности культуры. По сравнению с одинарной дозой NPK сочетание ее с последствием навоза 60 и 80 т/га способствовало дальнейшему увеличению урожайности зерна этой культуры на 7.5–10 ц/га. Органо-минеральная система (последствие навоза 80 т/га + 2NPK) достоверно повысила урожайность ячменя по сравнению с применением только двойной дозы полного минерального удобрения на 5.0 ц/га.

Максимальная урожайность ячменя 61.2 ц/га зерна получена при сочетании одинарной дозы NPK с последствием навоза 60 т/га. В этом варианте использование ФАР составило 3.0%.

В работе [17] установлено, что на серых лесных почвах Владимирского ополья при применении удобрений потребляемое количество осадков (326–356 мм) яровыми культурами соответствовало использованию 2.7–3.0% ФАР и обеспечивало получение урожая зерна 54–60 ц/га, озимыми рожью и пшеницей (386 мм) – ~4% ФАР. Урожайность зерна последних могла достигать 71–80 ц/га. Лимитирующим урожай яровых и озимых культур фактором являлась влагообеспеченность растений.

В 4-й ротации 7-польного севооборота средняя ежегодная продуктивность культур в зависимости от систем удобрения варьировала от 34.6–34.8 (контроль, фон известкования) до 47.7 ц з.е./га (сочетание навоза 80 т/га за ротацию с двойной дозой NPK). В 1-й и 2-й ротациях 8-польного севооборота (1991–2008 гг.) она изменялась от 29.0–32.9 до 41.5–43.3 ц з.е./га, в 3-й (2007–2015 гг., 7-польный севооборот) – от 30.8 до 45.5 ц з.е./га [9]. С увеличением длительности применения удобрений она неуклонно возрастала.

Математические зависимости между урожайностью культур севооборота, с одной стороны, и дозами применения органических удобрений в поле занятого пара (x_1 , т/га) и ежегодными дозами внесения азота в составе полного минерального удобрения (x_2 , кг/га), фосфорно-калийных (x_3 , кг/га, в расчете на P_2O_5) удобрений, с другой стороны, представлены в табл. 2. Они подтвердили определяющее влияние навоза КРС и азота минеральных удобрений как на урожайность отдельных культур севооборота, так и на среднюю его продуктивность.

Судя по величинам угловых коэффициентов при x_1 и x_2 , наиболее высокая прибавка урожайности от навоза и азота минеральных удобрений

Таблица 2. Взаимосвязь влияния удобрений на урожайность культур 7-польного севооборота в 4-й ротации, ц з.е./га

Культура, годы	Уравнение взаимосвязи, $n = 16$	Доверительный интервал	R^2
Викоовсяная смесь, 2014–2016	$Y = 20.5 + 0.023z_1 + 0.070x_2$	1.2	0.958
	$Y = 19.3 + 0.035z_1 + 0.064x_2 - 0.0003z_1z_3$	1.0	0.973
Озимая пшеница, 2015–2017	$Y = 49.4 + 0.086x_1 + 0.203x_2$	6.1	0.871
	$Y = 46.6 + 0.130x_1 + 0.499x_2 - 0.0015x_1x_2 - 0.003x_2x_3$	2.8	0.977
Овес, 2016–2018	$Y = 32.1 + 0.055x_1 + 0.118x_2$	4.0	0.846
	$Y = 30.4 + 0.080x_1 + 0.308x_2 - 0.0008x_1x_2 - 0.002x_2x_3$	2.1	0.964
Травы 1-го года пользования, 2017–2019	$Y = 52.8 + 0.024x_1 + 0.064x_2$	3.7	0.436
	$Y = 51.3 + 0.116x_1 + 0.089x_3 - 0.0012x_1^2 - 0.0013x_2^2 - 0.0013x_3^2$	2.5	0.808
Травы 2-го года пользования, 2018–2020	$Y = 26.2 + 0.046x_1 + 0.124x_2$	1.8	0.967
	$Y = 24.9 + 0.066x_1 + 0.177x_2 + 0.035x_3 - 0.0008x_2^2 - 0.0005x_1x_3$	1.1	0.990
	$Y = 26.0 + 0.046x_1 + 0.180x_2 - 0.0007x_2^2$	1.4	0.980
Яровая пшеница, 2019–2020	$Y = 36.0 + 0.048x_1 + 0.073x_2$	2.9	0.826
	$Y = 33.7 + 0.598x_1^{0.5} + 0.789x_2^{0.5} + 1.585x_3^{0.5} - 0.44(x_1x_2)^{0.5}$	1.6	0.957
Ячмень, 2020	$Y = 44.4 + 0.0783x_1 + 0.144x_2$	5.0	0.848
	$Y = 43.7 + 0.0783x_1 + 0.322x_2 - 0.0023x_2x_3$	3.7	0.924
Средняя продуктивность севооборота	$Y = 36.7 + 0.406x_1 + 0.111x_2$	2.6	0.918
	$Y = 35.8 + 0.386x_1 + 0.205x_2 + 0.049x_3 - 0.0019x_2^2$	1.6	0.972

Примечание. x_1 – доза навоза, внесенная в паровом поле, т/га; x_2 – ежегодно вносимая доза азота, кг/га; x_3 – ежегодно вносимая доза РК-удобрений в расчете на P_2O_5 , кг/га; z_1 – последствие доз навоза, внесенных в 3-й ротации (40, 60 и 80), т/га.

на серых лесных почвах была получена для озимой пшеницы, овса, трав 2-го года пользования и ячменя. В то же время на среднеплодородных почвах Нечерноземья разностные коэффициенты использования, например азота, по годам после внесения органических удобрений оценивали величинами: 1-й – 20–30%, 2-й – 30–35, 3-й – 10–15, 4-й – 5% [18]. Следовательно, размеры и длительность влияния органических удобрений на урожайность возделываемых культур зависели как от типа почвы, так и вида севооборота, а также погодных условий.

По сумме угловых коэффициентов при x_1 (z_1) для линейных взаимосвязей для отдельных культур определили суммарную прибавку, приходящуюся на 1 т навоза за севооборот (0.360 ц з.е./га). При среднем содержании 4.4 кг N/т прибавка на 1 кг азота органических удобрений составила 0.082 ц з.е./га.

По сумме угловых коэффициентов за севооборот при x_2 линейных взаимосвязей (0.796 ц/га), деленной на число полей, нашли прибавку урожайности культур при применении 1 кг азота ми-

неральных удобрений (0.114 ц з.е./га). При этом эквивалент минеральных удобрений (ЭМУ) навоза для азота составил 0.72. В то же время из линейной взаимосвязи средней продуктивности севооборота со среднегодовым применением навоза (т/га) и азота минеральных удобрений ЭМУ навоза для азота равнялся 0.83 (0.406 : 4.4 : 1.11 = 0.83). Средняя величина ЭМУ навоза для азота, рассчитанная из линейных взаимосвязей урожайности (продуктивности) культур севооборота, составила 0.78. Очевидно, эта величина ЭМУ навоза для азота близка к эффективности его использования при применении одних органических удобрений в сравнении с одними минеральными азотными.

Для всех культур севооборота при квадратичной зависимости выявлена более тесная связь между их урожайностью и примененными удобрениями, чем при линейной зависимости. Поэтому для расчета ЭМУ навоза для азота использовали и эту взаимосвязь средней продуктивности севооборота с удобрениями. Для этого угловой коэффициент при x_1 делили на величину содер-

Таблица 3. Размеры использования влаги культурами севооборотов в разные годы от среднегодового выпадения осадков

Культура	Количество выпадающих осадков, мм	Использование осадков в 4-й ротации		Использование осадков во 2-й и 3-й ротациях [17]	
		мм	%	мм	%
Викоовсяная смесь	480	180	38	254	53
Озимые	604	290	48	386	64
Овес	604	254	42	338	56
Травы 1-го года пользования	604	374	62	412	68
Травы 2-го года пользования	480	190	40	278	58
Яровая пшеница	604	318	53	356	59
Ячмень	604	317	52	326	54

жания азота в 1 т навоза и на угловой коэффициент при x_2 . ЭМУ навоза для азота в этом случае был равен 0.43 ($0.386 : 4.4 : 0.205 = 0.43$). Последняя теоретическая величина указывала на минимальный ЭМУ навоза для азота, когда применяют совместно невысокие дозы органических и минеральных азотных удобрений. В этом случае отзывчивость культур севооборота на азотные минеральные удобрения наиболее высокая. С увеличением доз органических и минеральных удобрений рост урожайности возделываемых культур от азота минеральных удобрений замедляется, а ЭМУ навоза для азота повышается. Максимум роста продуктивности от минерального азота культуры достигали при дозе N54. Величина ЭМУ навоза для азота должна была возрасти до 0.86. При средних ежегодных дозах навоза 5.7 (25 кг N/га), 8.6 (38 кг N/га) и 11.4 (50 кг N/га) т/га ЭМУ навоза для азота составит соответственно 0.55, 0.65 и 0.79. Сочетание органических удобрений с NPK обеспечивало больший рост содержания гумуса, чем от такой же дозы азота минеральных удобрений.

Рассчитанные в работах [2, 8–11] степенные или гиперболические зависимости между средней продуктивностью севооборота и мобильным фондом азота или запасами нитратного азота в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур могут свидетельствовать о том, что лимитирующими урожайность возделываемых культур факторами являются не только обеспеченность элементами питания, но и какие-либо другие. По нашему мнению, главнейшим из них является недостаток влаги, особенно в критические периоды роста и развития культур [17]. Поэтому режим влагообеспеченности в большинстве опытов был основным лимитирующим фактором формирования урожая.

При обобщении результатов исследования установлено (табл. 3), что на серых лесных почвах Владимирского ополья возделываемые культуры использовали 250–410 мм влаги [17], но эффективность ее расходования сильно зависела от погодных условий года, своевременности выпадения осадков. Например, общий расход влаги культурами севооборота в 4-й ротации варьировал от 180–190 (викоовсяная смесь и многолетние травы 2-го года пользования) до 374 мм – травами 1-го года пользования. Яровые и озимые культуры за весенне-летний период расходовали от 254 до 320 мм влаги. От среднегодовых размеров выпадения осадков за соответствующий период это составило 38–62, во 2-й и 3-й ротациях севооборотов [17] – 53–68%. Поэтому для повышения эффективности использования выпадающих осадков необходимо возделывание поукосных и промежуточных культур.

Показано, что и в 4-й ротации 7-польного севооборота эффективность использования влаги, соответственно – фотосинтетической активной радиации сильно зависела от систем удобрения (табл. 4). Применение навоза по сравнению с фоном известкования заметно снижало размеры потребления влаги на создание 1 ц з.е. Это наблюдали как при его действии (2-я культура), так и последствии. Наименьшее его последствие установлено на травах 1-го года пользования. В среднем в ротации применение органических удобрений повысило эффективность использования влаги на 14%. По сравнению с фоном известкования при сочетании навоза с NPK эффективность использования влаги возросла в 1.35 раза. Различий в использовании влаги между дозами применения полного минерального удобрения не наблюдали.

Таблица 4. Использование влаги культурами 7-польного севооборота в зависимости от систем удобрения

Вариант	Запасы влаги в 1-метровом слое почвы, мм		Осадки вегетационного периода, мм	Общий расход влаги, мм	Урожайность, ц з.е./га	K _{вод} , мм/ц з.е.	Использование влаги из слоя 40–100 см, мм	
	исходные	после уборки					среднее	максимальное
1-я культура, викоовсяная смесь, 2014–2016 гг.								
Известкование (фон)	291	247	132	176	19.0	9.3	30	52
Фон + навоз 60 т/га	291	242	132	181	21.8	8.3	31	54
Фон + Нав60 + N60	288	241	132	179	26.1	6.9	36	60
Фон + Нав60 + N75	290	240	132	182	26.8	6.8	34	58
2-я культура, озимая (2015–2016 гг.) и яровая (2017 г.) пшеница								
Известкование (фон)	304	250	231	285	44.5	6.4	45	58
Фон + навоз 60 т/га	297	240	231	288	52.8	5.5	49	58
Фон + Нав60 + N40P40K40	295	235	231	291	65.6	4.4	53	66
Фон + Нав60 + N80P80K80	298	234	231	295	66.7	4.4	55	66
3-я культура, овес, 2016–2018 гг.								
Известкование (фон)	289	240	195	244	29.8	8.2	41	56
Фон + навоз 60 т/га	295	230	195	260	34.4	7.6	48	54
Фон + Нав60 + N40P40K40	290	230	195	255	41.5	6.1	55	61
Фон + Нав60 + N80P80K80	291	227	195	259	42.9	6.0	53	61
4-я культура, травы 1-го года пользования, 2017–2019 гг. (2 укоса)								
Известкование (фон)	299	211	283	371	50.2	7.4	62	99
Фон + навоз 60 т/га	296	204	283	380	54.3	7.0	62	94
Фон + Нав60 + N40P40K40	291	203	283	371	54.1	6.9	56	91
Фон + Нав60 + N40P80K80	292	204	283	373	50.2	7.4	56	104
5-я культура, травы 2-го года пользования, 2018–2020 гг.								
Известкование (фон)	286	224	129	191	22.3	8.6	42	56
Фон + навоз 60 т/га	281	219	129	191	26.0	7.4	36	43
Фон + Нав60 + N40P40K40	280	222	129	187	31.6	5.9	40	59
Фон + Нав60 + N80P80K80	284	223	129	190	35.7	5.3	40	54
6-я культура, яровая пшеница, 2019–2020 гг.								
Известкование (фон)	296	237	265	324	33.8	9.6	47	66
Фон + навоз 60 т/га	293	240	265	318	38.4	8.3	37	53
Фон + Нав60 + N40P40K40	291	246	265	309	43.0	7.2	35	48
Фон + Нав60 + N80P80K80	288	233	265	320	44.6	7.2	37	48
7-я культура, ячмень, 2020 год								
Известкование (фон)	297	222	240	318	41.2	7.7	46	46
Фон + навоз 60 т/га	304	230	240	315	47.3	6.6	54	54
Фон + Нав60 + N40P40K40	294	224	240	310	61.2	5.1	49	49
Фон + Нав60 + N80P80K80	297	213	240	324	58.4	5.6	53	53

Примечание. Для 2-й культуры приведены данные по использованию влаги за весенне-летний период вегетации.

В связи с благоприятными физико-химическими свойствами подпахотных горизонтов (низкое содержание обменного алюминия) для всех культур севооборота установлено активное поглощение влаги из слоя почвы 40–100 см. В сред-

нем для зерновых культур и однолетних трав оно варьировало от 30 до 55 мм, в отдельные годы — от 55 до 66 мм. За период вегетации трав 1-го года пользования из-за промачивания летними осадками слоев глубже 40 см использование влаги из

слоя 40–100 см достигало 104 мм. Использование влаги из подпахотных горизонтов позволило возделываемым культурам уменьшить влияние стрессовых ситуаций в засушливые периоды, что стабилизировало их урожайность на достаточно высоком уровне. В среднем в ротации севооборота максимальные размеры использования влаги из слоя 40–100 см почвы слабо зависели от систем удобрения (59–63 мм).

Данные табл. 1 и 2 показали, что решающее влияние на урожайность культур севооборота оказало применение органических и азота минеральных удобрений. В работах [2, 8, 9, 11] выявлено, что они значительно повышали запасы нитратного и аммонийного азота в жидкой фазе почвы, т.е. размер мобильного фонда азота. Установлено также [13], что уже в 3-й ротации по сравнению с 1-й и 2-й запасы $N-NH_4$ снижались в 3–4 раза, резко уменьшились его переход в жидкую фазу почвы и доля участия в мобильном фонде азота. Величину последнего можно приравнять к запасам $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур. В этом случае отсутствовала необходимость расчета запасов аммонийного азота в жидкой фазе почвы, который выполняли обычно в середине или конце вегетации культур. Поэтому в 4-й ротации были проведены исследования влияния систем удобрения как на динамику запасов как нитратного, так и аммонийного азота, в почве под отдельными культурами и в среднем за севооборот.

Показано (табл. 5), что в вариантах 1–3 без внесения азотных минеральных удобрений запасы $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур варьировали от 22.9 до 72.8 кг/га. Наиболее низкими (22.9–26.8 кг/га) они были под многолетними травами, под которыми происходило уплотнение почвы, и процессы нитрификации шли более медленно. В среднем за севооборот этот показатель составил ≈ 44 кг/га и был близок к результатам, полученным в работах [2, 9]. Применение N_{aa} в составе НРК увеличивало запасы $N-NO_3$ до 60.3–143 кг/га при одинарной дозе и до 98.7–192 кг/га при двойной дозе полного минерального удобрения. При сочетании N_{aa} с навозом наблюдали дальнейший небольшой рост этого показателя. Внесение одних органических удобрений и их сочетание с РК-удобрениями вело к росту запасов $N-NO_3$ по сравнению с вариантами 1–3 в среднем в севообороте на 2–24 кг/га, в то время как применение одних азотных удобрений – на 52–95, их сочетания с навозом – на 60–117 кг/га. Процессы накопления нитратного азота в почве под травами 1-го года пользования зави-

сели и от доз внесения N_{aa} под предшествующие культуры (варианты 4 и 5, 10 и 11, 13 и 14, 15 и 16).

В середине вегетации культур (1-я декада июля) исходные запасы нитратного азота резко снижались (в основном за счет интенсивного потребления). В вариантах с применением азотных удобрений они уменьшились в 4 раза, органических удобрений и без удобрений – в 2–3 раза. Но в последних вариантах абсолютные запасы $N-NO_3$ были в несколько раз меньше, чем в вариантах удобрения азотом. Таким образом, в удобрениях N_{aa} варианты поглощение $N-NO_3$ было в несколько раз больше, чем без его применения. В результате этого наблюдали и более высокую продуктивность культур в первом случае (табл. 1).

Из взаимосвязей величин запасов $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур и доз азота удобрений видно, что 1 кг азота внесенных органических удобрений/га ежегодно повышал запасы $N-NO_3$ на 0.027–0.109 кг/га, 1 кг N_{aa} /га – на 1.04 кг/га и больше (табл. 6). Даже при действии навоза этот параметр при x_1 составил 0.063 кг/га. За севооборот 1 кг азота навоза повышал запасы $N-NO_3$ в ранний период вегетации культур на 0.380–0.395 кг, 1 кг N_{aa} /га – на 1.30 кг.

Близкие размеры влияния 1 кг азота органических удобрений на повышение запасов нитратного азота за ротацию наблюдали и при суммировании угловых коэффициентов при x_1 (z_1) линейных взаимосвязей: $0.051 + 0.071 + 0.061 + 0.042 + 0.027 + 0.109 + 0.0385 = 0.40$.

В то же время ЭМУ навоза для азота изменялся от 0.55 до 0.79. Очевидно, что часть нитратного азота органических удобрений, появлявшаяся при их минерализации в осенний период, весной передвигалась глубже 40 см [19]. Минеральные азотные удобрения вносили после схода снежного покрова. Их передвижение в весенний период глубже 40 см можно было наблюдать лишь в отдельные годы.

Видно также, что квадратичная взаимосвязь величин запасов нитратного азота за ротацию и среднегодовых доз азота навоза и минеральных удобрений показала, что пул дополнительно образованного азота (экстра-азота) резко возрастает при внесении высоких доз минерального азота.

Как и в работах [2, 9], установлена тесная степенная связь между средней продуктивностью 7-польного севооборота и среднегодовыми запасами $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур (рис. 1). Она свидетельствовала о том, что запасы нитратного азота не лимитировали продуктивность. Ограничивали ее чаще

Таблица 5. Запасы нитратного азота в слое 0–40 см почвы в начале и середине вегетации (уборка однолетних трав и трав 2-го года пользования) культур севооборота, кг/га

Вариант	Культуры, годы							Среднее, 2014–2020 гг.
	Викоовся- ная смесь, 2014–2016	Озимая пшеница, 2015–2017	Овес, 2016–2018	Травы 1-го г.п., 2017–2019	Травы 2-го г.п., 2018–2020	Яровая пшеница, 2019–2020	Ячмень, 2020	
Запасы в ранний период вегетации культур (1-й срок)								
1	41.8	38.7	35.7	24.8	24.3	61.7	72.8	42.8
2	51.4	39.8	36.7	26.3	22.9	63.4	69.3	44.2
3	50.2	42.2	36.5	24.4	23.3	64.2	68.8	44.2
4	112	69.7	89.5	72.6	60.3	143	129	96.6
5	149	150	121	103	98.7	192	166	140
6	45.4	52.1	40.8	25.4	25.4	80.4	75.7	45.7
7	60.6	58.5	49.1	28.7	27.3	92.4	82.5	57.0
8	49.7	64.4	57.9	35.1	28.4	97.3	84.3	59.6
9	60.9	52.2	52.1	26.1	28.5	95.4	75.6	55.8
10	125	81.1	92.4	81.8	64.7	162	123	104
11	162	149	126	120	105	212	164	148
12	58.9	62.4	51.5	28.0	25.7	94.4	77.5	56.9
13	130	82.9	101	85.5	66.1	162	131	108
14	163	155	135	123	118	210	169	153
15	71.4	72.8	63.3	37.2	25.4	122	87.4	68.5
16	134	91.1	99.1	91.6	73.5	174	141	115
17	169	163	150	128	119	224	179	162
Запасы в середине вегетации (во время уборки викоовсяной смеси и трав 2-го года пользования) культур севооборота								
1	18.5	16.0	12.7	10.8	11.6	27.6	8.7	15.1
2	25.0	16.8	12.5	12.1	10.5	31.0	9.5	16.8
3	22.0	16.6	11.9	12.7	12.9	31.7	8.9	16.7
4	28.9	20.5	17.7	25.1	18.5	54.7	16.6	26.0
5	35.4	45.4	28.2	35.5	30.2	65.8	23.1	37.7
6	25.3	17.2	13.4	14.4	16.0	44.4	10.3	20.1
7	23.9	17.9	16.5	16.4	16.8	42.4	10.6	20.6
8	20.9	17.4	18.5	14.3	16.9	47.3	9.7	20.7
9	21.9	16.6	13.7	16.2	18.4	46.8	8.3	20.3
10	31.6	26.0	20.0	28.6	14.6	50.2	23.3	27.8
11	29.9	45.7	28.5	44.9	29.8	64.2	28.9	38.7
12	24.1	16.4	16.4	16.3	18.5	44.4	11.6	21.1
13	27.3	21.5	20.9	30.2	14.4	47.8	13.4	25.1
14	36.2	41.0	29.5	43.1	29.8	54.2	35.9	38.5
15	26.2	22.7	17.0	18.5	17.9	50.4	15.7	24.1
16	35.4	22.4	20.1	32.4	17.7	50.6	26.2	29.3
17	38.1	47.8	38.3	45.6	37.9	65.9	38.1	44.5

всего условия увлажнения. В то же время в некоторые годы достижение высоких урожаев может ограничиваться и недостатком фотосинтетической активной радиации.

Например, урожайность зерна озимой пшеницы (рис. 2) практически по линейной зависимости увеличивалась с ростом запасов N-NO₃ до 67 ц/га при сочетании одинарной дозы NPK с

Таблица 6. Взаимосвязь величин запасов нитратного азота в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур и применения азота органических и минеральных удобрений (4-я ротация)

Культура	Год	Уравнение взаимосвязи, $n = 17$	R^2	Доверительный интервал
Викоовсяная смесь	2014–2017	$Y = 44.4 + 0.051z_1 + 1.30x_2$	0.974	16.5
		$Y = 45.4 + 0.052z_1 + 0.0185x_2^2$	0.983	13.1
Озимая пшеница	2015–2017	$Y = 38.9 + 0.063x_1 + 1.18x_2$	0.939	22.6
		$Y = 40.8 + 0.078x_1 + 0.0166x_2^2 - 0.0005x_1x_2$	0.996	6.4
Овес	2016–2018	$Y = 37.1 + 0.061x_1 + 1.07x_2$	0.985	10.0
		$Y = 39.0 + 1.07x_2 + 0.0002x_1^2$	0.986	9.5
Травы 1-го года пользования	2017–2019	$Y = 28.4 + 1.81x_2$	0.871	29.4
		$Y = 21.1 + 0.042x_1 + 1.78x_2$	0.893	27.9
Травы 2-го года пользования	2018–2020	$Y = 20.6 + 0.027x_1 + 1.04x_2$	0.990	7.6
		$Y = 25.4 + 0.894x_2 + 0.0008x_1x_2$	0.996	4.7
Яровая пшеница	2019–2020	$Y = 65.3 + 0.109x_1 + 1.59x_2$	0.974	20.1
		$Y = 63.4 + 0.108x_1 + 2.22x_2 - 0.0083x_2^2$	0.983	16.7
Ячмень	2020	$Y = 71.5 + 0.0385x_1 + 1.162x_2$	0.986	10.2
		$Y = 71.1 + 1.51x_2 + 0.0001x_1^2 - 0.0046x_2^2$	0.996	5.8
За севооборот	2014–2020	$Y = 42.3 + 0.39x_1 + 1.30x_2$	0.994	7.2
		$Y = 42.8 + 0.3945x_1 + 1.049x_2 + 0.0036x_2^2$	0.998	4.4

Примечание. x_1 – доза азота в навозе, внесенном в паром поле (4.4 кг N/т навоза); x_2 – средняя ежегодно вносимая доза азота минеральных удобрений, кг/га, z_1 – последствие доз навоза (40, 60 и 80 т/га), внесенных в 3-й ротации; за севооборот – среднегодовые дозы применения азота органических (x_1 , кг/га) и минеральных (x_2 , кг/га) удобрений.

действием навоза 80 т/га, внесенного в занятом пару. Повышение дозы NPK в 2 раза увеличивало урожайность всего на 1.6 ц/га. Расчеты по квадратичному уравнению (табл. 2) показали, что при сочетании двойной дозы NPK с навозом 60–80 т/га может достигаться урожайность зерна культуры до 94.3–97.0 ц/га. Однако в этом случае коэффициент использования ФАР должен составлять 4.9–5.0%, что может произойти при очень высоком уровне агротехники. В 7-польном зернотравяном севообороте на серых лесных почвах Верхневолжья должны применять ежегодную дозу внесения минеральных удобрений N40–45P40–45K40–45 в сочетании с навозом КРС 40–80 т/га за севооборот [2, 9]. Это обеспечивает положительный или бездефицитный баланс азота и фосфора, допустимый дефицит калия. В данном случае (рис. 1, 2) запасы N-NO₃ в слое 0–40 см почвы ($z = x + 40$) должны составлять ≈90–115 кг/га. Более высокие размеры выноса азота урожаем культур могли быть обеспечены поглощением N-NO₃ из более глубоких слоев почвы [2, 9, 19].

Между средней продуктивностью севооборота (y_{cp} , ц з.е./га) и среднегодовыми запасами нитратного азота (z_{cp} , кг/га) (рис. 1, уравнение (1)) в слое 0–40 см в ранний период вегетации культур установлена более тесная линейная связь показателей в вариантах без двойной дозы NPK:

$$y_{cp} = 36.8 + 0.135(z - 40), \quad R^2 = 0.865, \quad n = 13, \\ \text{доверительный интервал} = 3.0. \quad (1)$$

Очень тесную взаимосвязь наблюдали для тех же вариантов между величинами урожайности озимой пшеницы ($y_{оз}$, ц/га зерна) и запасов N-NO₃ (z , кг/га) в слое 0–40 см в тот же период вегетации культуры (рис. 2, уравнение (2)):

$$y_{оз} = 44.5 + 0.443(z - 37), \quad R^2 = 0.948, \quad n = 13, \\ \text{доверительный интервал} = 3.7. \quad (2)$$

Таким образом, при системах удобрения с одинарной дозой NPK запасы нитратного азота использовались наиболее эффективно.

В 4-й ротации 7-польного севооборота запасы аммонийного азота в слое 0–40 см почвы по сравнению с 1-й и 2-й ротациями 8-польного сево-

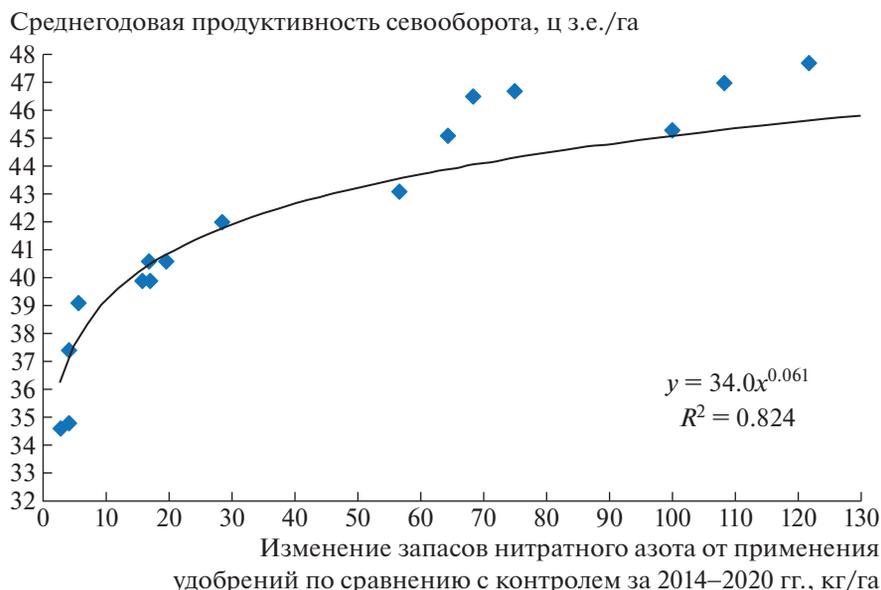


Рис. 1. Взаимосвязь средней продуктивности 7-польного севооборота (y , ц з.е./га) со среднегодовыми запасами $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур (z , кг/га), $x = z - 40$.

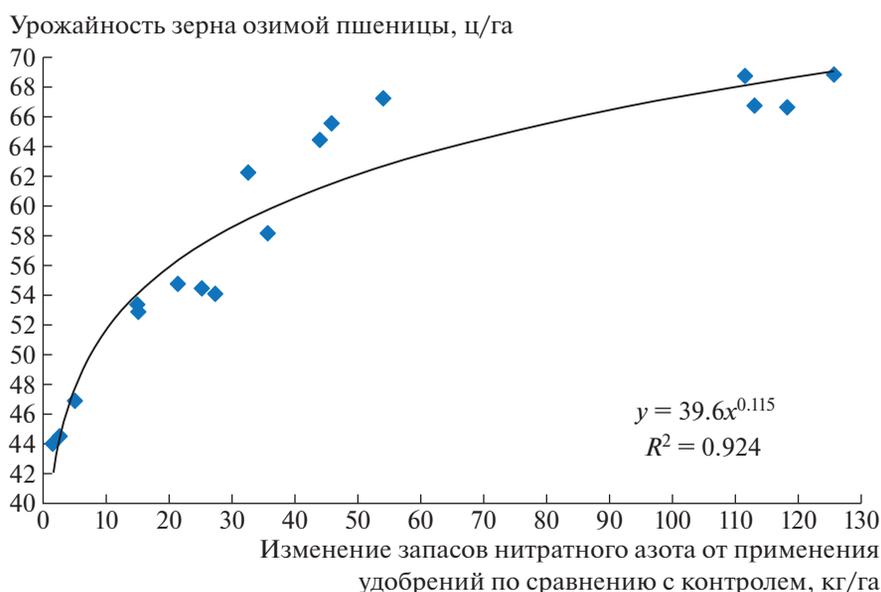


Рис. 2. Взаимосвязь между урожайностью озимой пшеницы (y , ц зерна/га) и запасами $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний весенний период ее вегетации (z , кг/га), $x = z - 37$.

оборота [13] снизились со 174–201 до 46–60 кг/га. В 3-й ротации в ранний период вегетации культур они варьировали от 96 до 127 кг/га.

В отличие от 1-й и 2-й ротаций в 4-й ротации в посевах ряда культур максимум запасов $N-NH_4$ наблюдали уже в середине их вегетации. Поэтому оценку их запасов в зависимости от культуры и варианта применения удобрений проводили по средним величинам за 3 срока наблюдений в течение вегетации. В слое 0–40 см почвы в 17-ти ва-

риантах средние показатели запасов $N-NH_4$ под культурами варьировали от 50 до 57 кг/га, в среднем за 2014–2020 гг. они составили 54 кг/га.

Данные влияния систем удобрения на средние запасы аммонийного азота в слое 0–40 см почвы в 4-й ротации свидетельствовали о их небольшом увеличении с ростом доз как полного минерального удобрения, так и органических удобрений (табл. 7).

Таблица 7. Влияние удобрений на средние запасы N-NH₄ в слое 0–40 см почвы в течение вегетации культур (2014–2020 гг.), кг/га (контроль – 46 кг/га)

Доза навоза (действие), т/га	0	PK	NPK	2NPK	Средние (навоз)
0	49	48	53	56	52
40	50	54	55	63	56
60	53	49	55	62	55
80	55	56	58	61	58
Средние (минеральные удобрения)	52	52	55	60	

По действию на озимой пшенице и последствию на овсе органических удобрений выявлено более высокое накопление аммонийного азота в ранний срок вегетации культур, последующее снижение его за счет поглощения в середине вегетации (табл. 8). На озимой пшенице наибольшее снижение запасов N-NH₄ в середине вегетации установлено в вариантах применения двойной дозы полного минерального удобрения, ее сочетания с навозом. При применении одинарной дозы NPK происходило такое же интенсивное потребление N-NH₄ высокими урожаями возделываемых культур, как и в случае внесения двойной дозы NPK. Однако в последнем случае процессы трансформации почвенного азота в аммонийную форму были более интенсивными, чем при использовании одинарной дозы NPK. Для последующих после овса культур севооборота такого закономерного снижения запасов N-NH₄ в середине их вегетации по сравнению с ее началом не наблюдали. Более слабое поглощение аммонийного

азота культурами в 4-й ротации севооборота по сравнению с 1-й и 2-й ротациями было обусловлено снижением его запасов в слое 0–40 см в 3 раза и больше, а также уменьшением его перехода в жидкую фазу с 4.2–4.8 до 1.5–2.2% [13].

ВЫВОДЫ

1. Данные урожайности культур в 4-й ротации 7-польного зернотравяного севооборота свидетельствовали о решающем влиянии азота минеральных удобрений и навоза на их величину, подтвердили их определяющее влияние и на среднюю продуктивность севооборота. Средняя продуктивность севооборота при последствии известкования составила 34.8 ц з.е./га, в вариантах применения за севооборот N300P240K240 – 43.1, N515P480K480 – 45.3 ц з.е./га.

2. Установлены максимальные размеры коэффициента использования фотосинтетической активной радиации (ФАР) различными культурами севооборота. Для зерновых культур и викоовсяной смеси они были максимальными в благоприятные по увлажнению годы и варьировали от 3.0 до 3.8%. Для трав 1-го и 2-го года пользования (клевер + тимофеевка) они составляли соответственно 3.3 и 3.7%. Условия увлажнения являлись основным фактором, лимитирующим урожайность культур. Среднее ежегодное применение N40–45P40–45K40–45 в сочетании с внесением навоза КРС 40–80 т/га за севооборот было достаточным для использования 3.4–4.0% ФАР. Для эффективного использования двойной дозы NPK с теми же дозами органических удобрений в условиях Верхневолжья отмечен и недостаток ФАР.

3. Средняя величина эквивалента минеральных удобрений ЭМУ навоза для азота, рассчитан-

Таблица 8. Влияние действия и последствия органических и действия минеральных удобрений на снижение запасов аммонийного азота в слое 0–40 см почвы в середине вегетации озимой пшеницы и овса по сравнению с ее началом, кг/га

Вариант	Пшеница, 2015–2017 гг.	Овес, 2016–2018 гг.	Вариант	Пшеница, 2015–2017 гг.	Овес, 2016–2018 гг.
1	14.5	4.2	10	12.6	10.3
2	12.9	6.9	11	24.3	16.3
3	20.4	4.8	12	17.1	2.0
4	13.7	7.9	13	14.9	6.6
5	27.3	1.9	14	23.3	7.3
6	8.6	3.1	15	17.3	4.4
7	16.0	7.9	16	11.2	7.5
8	12.6	2.2	17	24.8	10.5
9	8.3	2.1	Среднее	16.5	6.2

ная из линейных взаимосвязей урожайности (продуктивности) культур севооборота с удобрениями, составила 0.78. Эта величина ЭМУ близка к эффективности его использования при применении одних органических удобрений в сравнении с одними минеральными азотными. При квадратичной взаимосвязи максимум роста продуктивности культур от минерального азота достигался при его дозе N54. По расчетам при такой же дозе азота органических удобрений величина ЭМУ при совместном использовании с NPK увеличивалась до 0.86. При средних ежегодных дозах навоза 5.7 (25 кг N/га), 8.6 (38 кг N/га) и 11.4 (50 кг N/га) т/га с соответствующими дозами азота минеральных удобрений ЭМУ навоза для азота составил соответственно 0.55, 0.65 и 0.79. Менее значительное влияние азота органических удобрений в повышении продуктивности севооборота подтвердило его ведущую роль в поддержании более высокого запаса гумуса в изученных почвах.

4. За счет благоприятных физико-химических свойств подпахотных горизонтов серых лесных почв Верхневолжья корневые системы возделываемых культур севооборота (однолетних трав, зерновых) из слоя 40–100 см почвы использовали до 50–66 мм влаги, травы 1-го года пользования за 2 укоса – до 90–104 мм. Это позволило уменьшить стрессовые нагрузки в засушливых условиях, когда пересыхал верхний гумусовый слой.

5. Запасы нитратного азота в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур, когда активно проходили процессы трансформации аммонийного азота внесенных минеральных удобрений в нитратную форму, азота почвы и органических удобрений – в аммонийную и нитратную формы в зависимости от систем удобрения и возделываемых культур варьировали от 23 до 224 кг/га. Без внесения минеральных азотных удобрений запасы N-NO₃ менялись от 23 до 73 кг/га. Под многолетними травами они были минимальными, под яровыми зерновыми – максимальными и в среднем за ротацию составляли 43–44 кг/га. При применении навоза в дозах 40–80 т/га за севооборот средние за ротацию запасы N-NO₃ возрастали до 46–60 кг/га, при их сочетании с РК-удобрениями – до 56–68 кг/га. Резкое увеличение запасов N-NO₃ происходило в вариантах внесения полного минерального удобрения и сочетания его с органическими (в среднем за ротацию от 96.6 до 162 кг/га). В середине вегетации культур (уборки однолетних трав и трав 2-го года пользования) запасы нитратного азота по сравнению с 1-м сроком наблюдения снижались в 2–4 раза. Наибольшие размеры их снижения (при поглощении растениями) выявлены в вариантах с применением пол-

ного минерального удобрения и сочетания его с органическими.

6. За ротацию 7-польного севооборота 1 кг азота органических удобрений в слое 0–40 см почвы повышал запасы нитратного азота на 0.40 кг, 1 кг N минеральных удобрений – на 1.30 кг N-NO₃. Формирование пула нитратного азота 1 кг азотных минеральных удобрений >1 кг соответствовало образованию экстра-азота. Наибольший его запас формировался при применении высоких доз минерального азота. Более низкая величина образования нитратного азота 1 кг азота органических удобрений, чем их величина ЭМУ для азота, свидетельствовала о накоплении нитратного азота при минерализации навоза в осенний период и его передвижении глубже 40 см весной в период снеготаяния.

7. В 4-й ротации севооборота по сравнению с концом 2-й ротации запасы аммонийного азота в слое 0–40 см почвы снизились со 174–201 до 46–60 кг/га, а его переход в жидкую фазу уменьшился с 4.2–4.8 до 1.5–2.5%. Это способствовало слабому влиянию этой формы азота на урожайность возделываемых культур. В ранний период вегетации культур при высокой влажности почвы и температуре воздуха происходила быстрая трансформация N-NH₄ минеральных удобрений в нитраты, а органического азота – в аммонийную и нитратную формы. Использование запасов последней формы азота оказало определяющее влияние на урожайность культур и продуктивность севооборота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ненайденко Г.Н.* Рациональное применение удобрений в условиях рыночной экономики. Иваново, 2007. 350 с.
2. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Приемы комплексного использования средств химизации в севообороте на серых лесных почвах Верхневолжья в агротехнологиях различной интенсивности. Суздаль, 2017. 176 с.
3. Система ведения сельского хозяйства Владимирской области. Владимир: Изд-во ВАСХНИЛ НЗ РСФСР, 1983. 341 с.
4. Известкование кислых почв / Под ред. Авдониной Н.С., Петербургского А.В., Шедерова С.Г. М.: Колос, 1976. 304 с.
5. *Окорков В.В.* К теории химической мелиорации кислых почв // *Агрохимия*. № 9. 2019. С. 3–17.
6. *Сычев В.Г., Шафран С.А.* Агрохимические свойства почв и эффективность минеральных удобрений. М.: ВНИИА, 2013. 296 с.
7. *Лукин С.М.* Агроэкологическое обоснование системы применения удобрений в севооборотах на дерново-подзолистых супесчаных почвах: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2009. 49 с.

8. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Удобрения и продуктивность севооборотов на серых лесных почвах Верхневолжья // *Агрохимия*. 2018. № 2. С. 56–70.
9. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А.* Удобрения и тренды в плодородии серых лесных почв Верхневолжья. Иваново: Верхневолжский ФАНЦ, 2018. 228 с.
10. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Удобрения и модели их влияния на продуктивность и плодородие серых лесных почв Верхневолжья // *Владимир. земледелец*. 2019. № 2 (88). С. 4–11.
11. *Окорков В.В.* Модели продуктивности зернового севооборота на серых лесных почвах Верхневолжья // *Рос. сел.-хоз. наука*. 2018. № 1. С. 30–34.
12. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Влияние удобрений на содержание подвижных форм азота и урожайность овса на серых лесных почвах Верхневолжья // *Агрохимия*. 2020. № 2. С. 3–13.
13. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А.* Влияние удобрений на содержание подвижных форм азота в почвах Верхневолжья // *Владимир. земледелец*. 2020. № 1 (91). С. 4–12.
14. *Ягодин Б.А., Дерюгин И.П., Жуков Ю.П.* Практикум по агрохимии / Под ред. Ягодина Б.А. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
15. *Орлов Д.С., Лозановская И.Н., Попов П.Д.* Органическое вещество почв и органические удобрения. М.: Изд-во МГУ, 1985. 98 с.
16. *Попов П.Д., Хохлов В.И., Егоров А.А.* Органические удобрения: Справочник. М.: Агропромиздат, 1988. 207 с.
17. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Агроклиматические ресурсы серых лесных почв Владимирского ополья и их использование // *Современные тенденции в научном обеспечении агропромышленного комплекса. Коллект. монограф.* / Под ред. Окоркова В.В. Иваново: ПресСто, 2020. С. 115–129.
18. *Сафонов А.Ф., Гатаулин А.М., Платонов И.Г.* Системы земледелия / Под ред. Сафонова А.Ф. М.: КолосС, 2009. 447 с.
19. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А., Семин И.В.* Использование местных органических удобрений на серых лесных почвах Владимирского ополья // *Агрохимия*. 2013. № 4. С. 34–47.

Use of Agroclimatic Potential of the Gray Forest Soils of the Upper Volga Region in the Application of Fertilizers

V. V. Okorkov^{a, #}, O. A. Fenova^a, and L. A. Okorkova^a

^a *The Upper Volga Federal Agricultural Research Center
p. Noviy, Suzdal district, Vladimir region 601261, Russia*

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

For the ongoing long-term stationary experiment on gray forest soils of the upper Volga region on the 4th rotation of the 7-field crop rotation, the results of studies of the effect of fertilizer systems on the yield of cultivated crops and crop rotation productivity are presented. New data on the effect of mineral and aftereffect of organic fertilizers on these parameters are obtained. The effect of fertilizers, which increases the productivity of crop rotation, was limited by the size of the use of moisture by crops, and sometimes by photosynthetic active radiation. For the first time, quantitative data on the effect of nitrogen of organic and mineral fertilizers on the accumulation of nitrate nitrogen in the early periods of vegetation of crops, their determining role in increasing their yield, are presented. They explain the higher role of nitrogen of organic fertilizers in comparison with mineral nitrogen in maintaining and improving the humus state of gray forest soils of the upper Volga region, the formation of extra nitrogen when using high doses of mineral fertilizers.

Key words: gray forest soils, upper Volga region, stationary field experience, organic and mineral fertilizers, yield, productivity, crop rotation.