

УДК 631.816:631.582:633.2:631.445.24(470.31)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ В СЕВООБОРОТАХ С РАЗНОЙ ДОЛЕЙ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ ЦЕНТРА НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ РОССИИ

© 2020 г. В. В. Конончук^{1,*}, В. Д. Штырхунов¹, Г. В. Благовещенский¹,
С. М. Тимошенко¹, Т. О. Назарова¹

¹ Федеральный исследовательский центр “Немчиновка”

143026 Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Новоивановское, ул. Агрохимиков, 6, Россия

*E-mail: vadimkononchuk@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.01.2020 г.

После доработки 14.02.2020 г.

Принята к публикации 10.04.2020 г.

На известкованной дерново-подзолистой почве Центрального Нечерноземья с очень высокой обеспеченностью пахотного слоя подвижным фосфором, повышенной — калием, близкой к нейтральной реакцией среды и содержанием гумуса 1.9–2.06% органическая система удобрения (навоз 36 т/га в последствии) обеспечивала в 6-польных зернокартанных севооборотах с 28- и 50%-ной долей многолетних бобовых трав среднегодовой за 18 лет сбор зерновых единиц (з.е.) на уровне 2.8–3.2 т/га, накопление сырого протеина и обменной энергии — 6.04 и 8.23 ц/га, 42.1 и 54.8 ГДж/га или 80–99% от достигнутого максимума, в расчете на 1 кг з.е. — 218 и 259 г, 15.2 и 17.2 МДж соответственно. При этом содержание гумуса в почве к концу исследования сохранялось на исходном или несколько более высоком уровне. Содержание подвижного фосфора и калия уменьшилось за 18 лет соответственно на одну и две градации обеспеченности (с VI до V и с IV до II), что предполагает дополнительное внесение фосфорных и калийных удобрений дозами, рассчитанными на поддержание содержания P_2O_5 и K_2O в почве в оптимальном диапазоне (IV–V группы обеспеченности по принятым градациям). В целях снижения отрицательных последствий подкисления почвы, среднегодовая за 18 лет скорость которого составила 0.039 и 0.067 ед. pH_{KCl} , обоснована необходимость проведения поддерживающего известкования.

Ключевые слова: Нечерноземье, дерново-подзолистая почва, севооборот, многолетние травы, удобрение, продуктивность, плодородие почвы.

DOI: 10.31857/S0002188120070078

ВВЕДЕНИЕ

В Нечерноземной зоне РФ удобрениям принадлежит решающая роль в формировании урожайности и качества сельскохозяйственных культур. Их внесение не только создает благоприятные условия для продукционного процесса, но и способствует изменению свойств почвы, направленность и интенсивность которого определяется составом культур севооборотов, видом и дозами используемых удобрений.

Учет особенностей воздействия на почву органических и минеральных удобрений как при одностороннем, так и при совместном внесении позволяет разрабатывать динамичные системы удобрения в севооборотах, не только обеспечивающие получение экономически значимых урожаев хорошего качества, но и поддерживающие

плодородие пахотного слоя на заданном уровне в течение длительного времени.

Источником информации об эффективности удобрений и влиянию их на плодородие почвы служат многолетние стационарные полевые опыты. Чем длительнее по времени полевой эксперимент, тем более достоверную информацию об урожайности культур, эффективности удобрений и поведении в почве элементов питания растений он предоставляет. Поэтому сохранение и приумножение длительных полевых опытов с удобрениями на территории Российской Федерации на современном этапе ее экономического развития является приоритетной задачей агрохимической науки.

В последние 30–35 лет применительно к преобладающим почвенным разностям Центрально-

го Нечерноземья опубликован ряд глубоких обобщений по влиянию длительного применения удобрений на урожайность культур, качество получаемой продукции и свойства почвы. Среди них наибольший научный и практический интерес представляют монографии А.Д. Хлыстовского [1], В.И. Никитишена [2], коллективный труд ученых ВИУА по вопросам расширенного воспроизводства плодородия почв в интенсивном земледелии под редакцией Н.З. Милащенко [3], а также ряд публикаций ученых — агрохимиков Верхневолжья [4, 5] и другие. Теоретические вопросы особенностей поведения отдельных элементов питания в зональных почвах в связи с возделыванием культур и внесением удобрений подробно изложены в коллективных монографиях [6–8], а также в трудах известных агрохимиков [9–11]. В них с привлечением обширного экспериментального материала подробно проанализированы особенности и направленность трансформации элементов питания удобрений в почве, их влияние на продуктивность культур и количественные параметры отдельных показателей плодородия при длительном систематическом внесении. Приведены прогнозные расчеты, позволяющие определить направленность изменения плодородия пахотного слоя при различных сценариях применения удобрений в севооборотах зернового и зернокармливого направления.

В то же время актуальность исследований эффективности удобрений и воздействия их на почву и культурный фитоценоз в биологизированных севооборотах с повышенной и высокой долей многолетних трав и зернобобовых культур в Нечерноземной зоне России в современных условиях многократно возрастает по причине низких объемов поставок и применения удобрительных средств и химических мелиорантов.

В связи с вышеизложенным цель работы — выявление доз и сочетаний удобрений в зернокармливых севооборотах с разной насыщенностью многолетними травами, обеспечивающих повышение продуктивности севооборотов и плодородия дерново-подзолистых суглинистых почв.

В задачи исследования входило:

- выявление особенности влияния систем удобрения на продуктивность отдельных культур и севооборотов в зависимости от доли многолетних трав;

- установление характера влияния удобрений на основные показатели плодородия дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы при длительном внесении в севооборотах с разной долей многолетних трав;

- предложение производству системы удобрения биологизированных зернокармливых севооборотов, обеспечивающей получение высокой урожайности культур, продуктивности севооборотов и улучшение основных агрохимических параметров плодородия пахотного слоя почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 1992–2010 гг. на опытном поле НИИСХ ЦРНЗ (в настоящее время — ФИЦ “Немчиновка”), расположенном в Одинцовском р-не Московской обл., в 2-х длительных стационарных полевых опытах, заложенных в 2-х закладках каждый, в 3-х ротациях 6-польных зернокармливых севооборотов с насыщением многолетними травами 17–33 и 50%, где в травяных звеньях высевали соответственно клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) и двойную бобовую травосмесь из клевера лугового и люцерны пестрогибридной (*Trifolium pratense* L. + *Medicago sativa* L.).

Почва — дерново-подзолистая среднесуглинистая на моренном суглинке. Перед закладкой опытов пахотный (0–20 см) слой ее характеризовался следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса — 1.9–2.06%, подвижного фосфора и калия — 255–286 мг/кг и 120–132 мг/кг соответственно, pH_{KCl} 5.9–6.3, H_t — 1.74–1.87 мг-экв/100 г, содержание обменных кальция и магния — 7.6–7.8 и 0.94–1.73 мг-экв/100 г соответственно.

После уборки предшественника (озимых зерновых) почва под опытами была известкована дозой 5.0 т $CaCO_3$ /га и под вспашку зяби внесен навоз в дозе 36 т/га, рассчитанной на весь период исследования. Дозу навоза определяли из расчета минимального годового выхода вследствие существенного сокращения поголовья КРС.

Чередование сельскохозяйственных культур в севообороте с разной долей многолетних трав в годы исследования претерпевало определенные изменения, направленные на снижение отрицательных последствий “почвоутомления”. В основном это касалось севооборота с меньшим насыщением травами (табл. 1).

В процессе исследования использовали сорта озимых и яровых, а также зернобобовых культур селекции ФИЦ “Немчиновка”: ячмень яровой сортов Эльф, Рахат, Нур, овес сортов Скакун, Борец, озимое тритикале сортов Виктор, Гермес, озимую пшеницу сорта Немчиновская 24, горох полевой сортов Немчиновский 817, Флора 2, люпин узколистный сорта Ладный. В травяных звеньях севооборотов высевали сорта многолетних

Таблица 1. Чередование сельскохозяйственных культур в севооборотах с разной долей многолетних трав

Доля многолетних трав в севообороте, %	Ротации севооборота, годы		
	1-я 1992–1998	2-я 1998–2004	3-я 2004–2010
17–33	1. Ячмень 2. Люпин на зерно 3. Овес + клевер 4. Клевер на один год 5. Озимое тритикале 6. Люпин на зерно	1. Ячмень + клевер 2. Клевер 1-го года пользования 3. Клевер 2-го года пользования 4. Озимое тритикале 5. Овес 6. Горох полевой на зерно	1. Ячмень + клевер 2. Клевер 1-го года пользования 3. Клевер 2-го года пользования 4. Озимая пшеница 5. Овес 6. Горох полевой на зерно
50	1. Ячмень + многолетние травы (клевер + люцерна) 2. Клевер + люцерна 1-го года пользования 3. Клевер + люцерна 2-го года пользования 4. Клевер + люцерна 3-го года пользования 5. Озимое тритикале 6. Люпин на зерно	1. Ячмень + многолетние травы (клевер + люцерна) 2. Клевер + люцерна 1-го года пользования 3. Клевер + люцерна 2-го года пользования 4. Клевер + люцерна 3-го года пользования 5. Озимое тритикале 6. Овес	1. Ячмень + многолетние травы (клевер + люцерна) 2. Клевер + люцерна 1-го года пользования 3. Клевер + люцерна 2-го года пользования 4. Клевер + люцерна 3-го года пользования 5. Озимая пшеница 6. Овес

трав селекции ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса: клевер луговой сорта ВИК 7, люцерну пестрогибридную сорта Вега.

В опытах изучали следующие варианты систем удобрения: 1 – без удобрений (контроль), 2 – навоз 36 т/га, 3 – навоз + N30P60K60, 4 – навоз + N60P120K120, 5 – N30P60K60. В севообороте с насыщением травами 17–33% вариант 5 с минеральной системой удобрения введен со 2-й ротации.

Минеральные удобрения в опытах вносили только под зерновые колосовые культуры. Многолетние травы и зернобобовые выращивали при их последствии. Навоз вносили один раз за весь период исследования под первую культуру севооборота с осени после уборки предшественников.

Заметное увеличение среднегодовых доз N- и K-удобрений в 3-й ротации севооборотов было обусловлено увеличением их применения под озимую пшеницу и овес в зерновом звене с N30K60 до N130K160 и N60K90, с N60K120 до N160K180 и N90K120 соответственно. В зерновом звене 3-й ротации севооборотов не вносили фосфорные удобрения по причине достижения высокой и очень высокой обеспеченности пахотного слоя почвы подвижным фосфором уже к концу 2-й ротации. В результате среднегодовые в ротациях дозы удобрений были следующими (табл. 2).

Агрохимические анализы почвы и растений (зерна, соломы) проводили по методикам и ГО-

Стам, принятым в Агрохимической службе в аккредитованной лаборатории массовых анализов института. Содержание сырого протеина в урожае сухой массы трав, зерне колосовых зерновых и зернобобовых культур рассчитывали как произведение величин содержания $N_{\text{общ}}$ и коэффициента 6.25, содержание обменной энергии – по формулам, приведенным в [12]. Общую биологическую активность определяли по интенсивности выделения CO_2 в свежих почвенных образцах, отобранных в течение вегетации последней культуры севооборотов в конце каждой ротации с использованием методики Штатнова [13], активность каталазы – газометрическим методом в модификации Галстяна, активность полифенолоксидазы – по образованию пурпурогаллина из пирогаллола [14].

Повторность в опытах четырехкратная, общая площадь делянки 120–140 м², учетная – от 80 до 100 м².

Агротехника возделывания сельскохозяйственных культур соответствовала зональным рекомендациям, кроме изученных элементов [15]. Результаты учетов после приведения к стандартной влажности и 100%-ной чистоте подвергали дисперсионному анализу по методике [16].

Метеорологические условия вегетационных периодов (апрель–сентябрь) в годы исследования имели существенные отличия от средних многолетних показателей, как по сумме и распре-

Таблица 2. Среднегодовые дозы навоза и минеральных удобрений в севооборотах с различным насыщением многолетними травами (1992–2010 гг.)

Вариант	Навоз, т/га				N				P ₂ O ₅				K ₂ O			
					кг/га											
	1	2	3	сред- нее	1	2	3	сред- нее	1	2	3	сред- нее	1	2	3	сред- нее
Доля многолетних трав в севообороте 17–33%																
Без удобрений	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Навоз, 36 т/га	Последействие			2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Навоз + + N30P60K60				2	15	15	36.7	22.2	30	30	10	23.3	30	30	40	33.3
Навоз + + N60P120K120				2	30	30	51.7	37.2	60	60	20	46.7	60	60	65	61.7
N30P60K60*				–	0	0	0	–	15	36.7	25.8	–	30	10	20	–
Доля многолетних трав в севообороте 50%																
Без удобрений	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Навоз, 36 т/га	6	После- действие		2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Навоз + + N30P60K60	6			2	10	15	36.7	20.6	20	30	10	20	20	30	40	30
Навоз + + N60P120K120	6			2	20	30	51.7	33.9	40	60	20	40	40	60	65	55
N30P60K60*	0			0	0	0	10	15	36.7	20.6	20	30	10	20	20	30

*В 1-й ротации – первые 4 варианта.

делению осадков, так и по температурному режиму. Судя по величине интегрального показателя (гидротермического коэффициента) 52.5% вегетационных периодов характеризовалось не вполне благоприятными и 47.5% – относительно благоприятными условиями возделывания сельскохозяйственных культур (ГТК = 0.82–2.21 и 1.23–1.66

Таблица 3. Гидротермический коэффициент за период активной вегетации сельскохозяйственных культур (апрель–сентябрь) (1992–2010 гг.), по данным АМС “Немчиновка”

Условия увлажнения	Годы	ГТК	Годы	ГТК	%
Острозасушливые, засушливые	1992	0.78	1995	0.82	31.5
	1995	1.04	2002	0.74	
	1997	1.19	2010	1.15	
Избыточно-влажные, влажные	1993	2.11	2004	1.90	21.0
	1998	2.21	2008	1.92	
Нормальные	1994	1.46	2001	1.41	16.0
	1996	1.45			
Среднезасушливые, средневлажные	2000	1.29	2006	1.31	31.5
	2003	1.65	2007	1.23	
	2005	1.66	2009	1.23	

соответственно) при среднем многолетнем показателе 1.52 (табл. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На протяжении всего периода исследования в севообороте с меньшим (17–33%) насыщением многолетними травами величину урожайности озимых и яровых зерновых культур определяло использование органо-минеральных систем удобрения. В среднем за 3 ротации максимальная урожайность зерна ячменя, овса, озимого тритикале (или пшеницы), равная соответственно 3.02, 3.86, 5.70 т/га (прибавка 48, 20 и 37% к контролю без удобрений) создавалась внесением доз N30–60P60–120K60–120 на фоне последствия навоза. Для клевера предпочтительнее выглядела минеральная система, где в среднем за 2-ю и 3-ю ротации сбор сухой надземной массы составил 10.1 т/га (прибавка 27%), а при выращивании зернобобовых в лучшую сторону выделялся вариант органической системы удобрения (навоз 36 т/га в последствии), обеспечивший получение зерна люпина и гороха до 3.0 т/га.

В целом наибольший общий сбор зерновых единиц (з.е.) 17.9–18.2 т/га (прибавка 14–16%) формировался в вариантах органо-минеральных

Таблица 4. Продуктивность культур в севообороте с низкой долей многолетних трав в зависимости от удобрения (среднее в 3-х ротациях, 1992–2010 гг.)

Культура севооборота	Урожайность, т/га					Сбор сырого протеина, ц/га					Накопление обменной энергии, ГДж/га				
	Без удобрения	Навоз 36 т/га	Навоз + N30P60K60	Навоз + N60P120K120	N30P60K60	Без удобрения	Навоз 36 т/га	Навоз + N30P60K60	Навоз + N60P120K120	N30P60K60	Без удобрения	Навоз 36 т/га	Навоз + N30P60K60	Навоз + N60P120K120	N30P60K60
Ячмень (ячмень + травы), $HSP_{05} = 0.19-0.30$	2.04	2.22	2.71	3.02	2.72	2.56	2.86	3.43	3.75	2.90	24.0	26.4	32.0	35.7	31.2
Люпин на зерно*, $HSP_{05} = 0.18$	1.79	1.64	1.60	1.39	—	5.00	4.44	4.79	3.94	—	24.3	21.4	21.0	18.2	—
Овес, $HSP_{05} = 0.17-0.30$	3.21	3.29	3.86	3.77	3.82	3.52	3.57	4.17	4.33	4.45	37.3	38.1	44.6	44.1	44.8
Клевер луговой**, $HSP_{05} = 0.23-0.42$	7.90	8.31	8.11	7.24	10.1	12.9	13.5	13.8	11.9	16.9	74.7	79.8	76.1	74.7	96.6
Тритикале озимое***, $HSP_{05} = 0.16-0.37$	4.15	4.50	5.18	5.70	6.06	4.25	4.39	5.64	6.59	7.05	46.7	50.5	60.0	66.9	71.2
Горох на зерно****, $HSP_{05} = 0.13-0.36$	2.51	2.80	2.54	2.63	2.94	6.51	7.50	6.44	6.77	7.20	32.6	36.5	32.8	34.2	38.1
Суммарная продуктивность, т з.е./га	15.7	16.6	17.9	18.2	16.9	34.7	36.2	38.2	37.3	38.5	240	253	267	274	282

*Только в 1-й ротации.

**Во 2-й и 3-й ротациях — 2-х лет пользования.

***В 3-й ротации — озимая пшеница.

****В 1-й ротации — люпин на зерно.

систем удобрения, а величины накопления сырого протеина и обменной энергии при этом составляли 37.3–38.2 ц/га и 267–274 ГДж/га или 6.21–6.41 ц/га и 44.4–45.6 ГДж/га в среднем в год. В варианте с последствием навоза (органическая система удобрения) среднегодовой выход зерновых единиц, сырого протеина и энергии уменьшался до 2.77 т/га, 6.04 ц/га и 42.1 ГДж/га (90–95% от достигнутого максимума). С учетом состояния основных показателей плодородия почвы к концу исследования и полученных величин продуктивности этот вариант следует считать оптимальным для конкретных условий возделывания (табл. 4).

Расчеты показали, что при указанной среднегодовой продуктивности обеспеченность 1 кг з.е. сырым белком и энергией находилась на уровне 218 г и 15.2 МДж и существенно превосходила нормативные требования ГОСТ к концентрированным кормам [12], что позволило с наибольшей отдачей и наиболее экономно их расходовать.

Повышение доли многолетних трав в севообороте до 50% оказывало положительное влияние в первую очередь на общий сбор сухой надземной

массы последних, увеличивая его в среднем с 8.32 т/га до 13.6 т/га или на 60%. Возрастала также урожайность зерна люпина узколистного в 1-й ротации (прибавка 24%) и овса в последующих 2-х ротациях (прибавка 12%). В то же время урожайность озимых культур в целом снижалась на 7% вследствие полегания тритикале.

Как и в предыдущем севообороте, наиболее высокая урожайность культур зерновой группы (яровых и озимых) формировалась в вариантах органо-минеральной системы удобрения. Многолетняя клеверно-люцерновая травосмесь максимальный сбор сухой массы обеспечивала при последствии навоза (органическая система удобрения). В связи с этим общий сбор з.е. достигнутого максимального уровня, равный 23.5–24.0 т/га (3.92–4.00 т/га в год) создавался при использовании органо-минеральных систем удобрения. Эти величины на 31–32% превышали размеры аналогичного показателя в севообороте с меньшей долей трав и на 34–37% — сбор з.е. в контрольном варианте. Следует отметить, что общее накопление сырого протеина и обменной

Таблица 5. Продуктивность культур в севообороте с высокой долей многолетних трав в зависимости от удобрения (среднее в 3-х ротациях, 1992–2010 гг.)

Культура севооборота	Урожайность, т/га					Сбор сырого протеина, ц/га					Накопление обменной энергии, ГДж/га				
	Без удобрения	Навоз 36 т/га	Навоз + N30P60K60	Навоз + N60P120K120	N30P60K60	Без удобрения	Навоз 36 т/га	Навоз + N30P60K60	Навоз + N60P120K120	N30P60K60	Без удобрения	Навоз 36 т/га	Навоз + N30P60K60	Навоз + N60P120K120	N30P60K60
Ячмень + травы, $HCP_{05} = 0.16-0.25$	2.10	2.29	2.80	3.31	3.08	2.50	2.57	3.17	3.97	3.27	24.3	26.7	29.8	39.0	33.5
Многолетние травы за 3 года, $HCP_{05} = 0.34-0.42$	17.2	18.3	17.1	16.7	12.3	30.3	31.2	28.3	27.7	26.9	168	176	163	167.5	157
Озимое тритикале*, $HCP_{05} = 0.26-0.36$	4.02	4.72	4.98	5.13	5.04	4.50	5.20	5.93	5.90	5.33	46.8	55.5	58.9	58.7	53.6
Овес**, $HCP_{05} = 0.26-0.36$	3.85	3.86	4.24	4.03	4.16	4.30	4.30	5.00	4.67	4.76	44.8	45.0	51.0	47.6	48.9
Люпин на зерно, $HCP_{05} = 0.24$	1.80	1.96	1.82	2.28	2.03	5.60	6.10	6.00	7.30	6.50	23.4	26.1	24.0	30.0	26.8
Суммарная продуктивность, т з.е./га	17.5	19.1	23.5	24.0	21.5	47.2	49.4	48.4	49.5	46.8	307	329	327	343	320

*В 3-й ротации — озимая пшеница.

**В 1-й ротации — люпин на зерно.

энергии в товарной части урожая возделываемых культур при этом также характеризовались максимальными величинами: 48.4–49.5 ц/га и 326–343 га, что было больше контроля соответственно на 2.5–5.0 и 6–12%. Органическая система удобрения по сбору з.е. уступала органо-минеральным системам примерно на 20%, однако по накоплению протеина и энергии находилась на уровне последних, обеспечивая показатели, равные 96–99% от достигнутого максимума (табл. 5). Минеральная система удобрения по продуктивности занимала промежуточное положение, несколько уступая вариантам органо-минеральных систем. Учитывая меньшую затратность органической системы удобрения и достаточно высокий уровень сбора протеина и энергии в товарной продукции, она также может быть принята в качестве оптимальной в данном севообороте. В этом варианте на каждый кг з.е. приходилось 259 г сырого протеина и 17.2 МДж обменной энергии, что также заметно превышало рекомендованные нормативы.

Роль многолетних трав в формировании протеиновой и энергетической составляющих продуктивности в изученных севооборотах находилась в соответствии с их долей и в варианте орга-

нической системы при меньшей насыщенности травами составляла соответственно 37 и 32%, увеличиваясь до 63 и 57% в севообороте с большей долей трав (табл. 4, 5).

Следовательно, в севооборотах с 28- и 50%-ным насыщением бобовыми травами среднегодовая продуктивность порядка 2.8–3.2 т з.е./га в среднем за 18-летний период исследования могла быть получена за счет последствий подстилочного навоза КРС 36 т/га. При этом обеспеченность 1 кг з.е. сырым протеином и энергией составляла соответственно 218 и 259 г, 15.2 и 17.2 МДж, что было намного больше известных нормативов, предусмотренных существующими Государственными стандартами и стандартами организации.

Для повышения надежности заключения об оптимальных системах удобрения в изученных севооборотах были привлечены полученные в этих же опытах результаты воздействия длительного применения удобрений на основные агрохимические и отдельные биологические показатели плодородия пахотного слоя почвы. Установлено, что известкование дозой 5.0 т $\text{CaCO}_3/\text{га}$, проведенное в севооборотах перед закладкой опытов, поддерживало величины pH_{KCl} в слое 0–20 см

Таблица 6. Изменение физико-химических свойств дерново-подзолистой почвы в зависимости от доли многолетних трав в севооборотах и применения удобрения (слой 0–20 см почвы)

Доля многолетних трав в сево- обороте, %	Вариант системы удобрения	рН _{KCl} , ед.			<i>H</i> _Г			Ca ²⁺			Mg ²⁺		
					мг-экв/100 г почвы								
		Ротация											
		1-я	2-я	3-я	1-я	2-я	3-я	1-я	2-я	3-я	1-я	2-я	3-я
28 (17—33)	Исходное состояние	5.9			1.87			7.60			1.73		
	1. Без удобрений	6.4	5.1	5.3	1.72	3.33	2.93	6.8	6.6	6.0	1.75	0.97	1.20
	2. Навоз 36 т/га	6.4	5.1	5.2	1.70	3.44	3.00	7.0	6.2	6.4	1.63	0.85	0.99
	3. Навоз + N30P60K60	6.4	5.3	5.3	1.66	2.90	2.73	7.4	6.8	6.4	1.25	1.24	0.99
	4. Навоз + N60P120K120	6.0	5.7	5.5	1.64	2.34	2.74	7.4	7.6	6.5	1.32	1.53	0.92
	5. N30P60K60	—	5.6	5.1	—	3.24	3.84	—	7.6	6.0	—	0.97	0.97
50	Исходное состояние	6.3				1.74		7.80			0.94		
	1. Без удобрений	6.2	5.38	5.0	1.74	1.94	3.23	9.8	9.2	6.4	0.60	1.00	0.80
	2. Навоз 36 т/га	6.5	6.0	5.1	1.44	2.46	3.16	9.4	8.7	8.4	0.90	0.90	0.80
	3. Навоз + N30P60K60	6.3	6.0	5.2	1.70	2.26	2.63	9.2	9.1	9.4	0.80	1.10	0.70
	4. Навоз + N60P120K120	6.0	5.8	5.5	1.85	2.58	2.86	9.2	9.4	9.0	0.90	0.80	0.50
	5. N30P60K60	6.3	5.4	5.0	1.44	2.49	2.25	9.2	5.5	6.2	0.80	0.80	0.60

почвы в вариантах удобрения в пределах нейтральной или близкой к нейтральной реакции среды в севообороте с меньшей долей многолетних трав только в течение 1-й ротации, а при более высоком насыщении травами — в течение первых 2-х ротаций. В дальнейшем отмечали выраженное подкисление почвы во всех вариантах систем удобрения, включая контроль. Оно характеризовалось не только снижением pH_{KCl} на одну градацию, но и ростом гидролитической кислотности, уменьшением содержания обменных кальция и магния. Отмеченная тенденция к изменению физико-химических свойств почвы под влиянием возделываемых культур и примененных удобрений, с одной стороны, объясняется усилением нитрификации под влиянием азотных минеральных удобрений в составе NPK и навоза, с другой стороны — проявлением подзолообразовательного процесса, которых имеет непрерывный характер, на что справедливо указывал А.Д. Хлыстовский [1]. При этом наибольшую скорость снижения pH_{KCl} на 0.18–0.21 ед. в год отмечали в течение 2-й ротации севооборота с меньшей долей многолетних трав в вариантах органической и органо-минеральной (вариант 3) систем удобрения, а также в контроле без удобрений. Изменение величин гидролитической кислотности в почве во времени в этом севообороте имело аналогичную направленность (табл. 6).

В севообороте с высоким насыщением многолетними бобовыми травами повышение обменной и гидролитической кислотности почвы происхо-

дило медленнее. Скорость подкисления (судя по величине pH_{KCl}) в зависимости от вариантов возрас- тала от 0.03–0.07 ед. в течение 2-й ротации до 0.13–0.15 ед. в среднем в год в 3-й ротации без чет- кой связи с дозами и сочетанием удобрений.

В обоих севооборотах к концу 18-го года иссле- дования величины гидролитической кислотности почвы в зависимости от вариантов удобрения ва- рыировали в диапазоне от 2.25–2.73 до 3.00–3.84 мг-экв/100 г и превышали исходный уровень на 0.38–0.86 и 1.26–2.10 мг-экв/100 г (на 20–46 и 72–120%) соответственно. Однако обменного алюминия в почве при этом не было обнаружено. Эти показатели были существенно меньше кри- тических величин и не оказывали отрицательного влияния на урожайность культур (табл. 4–6).

Характер динамики содержания обменных ос- нований в почве во времени при однократном из- вестковании определяла заметная роль травяного звена и видового состава возделываемых много- летних трав. Наличие 1-го–2-х полей клевера лу- гового в севообороте с 17–33%-ным насыщением травами не способствовало сохранению содержа- ния обменных Ca и Mg на исходном уровне. К концу 3-й ротации их содержание уменьшилось с 7.6 и 1.73 до 6.0–6.5 и 0.92–1.20 мг-экв/100 г или на 21–14 и 47–31% соответственно за счет выщела- чивания за пределы изученного слоя почвы и по- требления растениями на формирование урожая.

При более высоком 50%-ном насыщении се- вооборота многолетними травами и возделыва-

Таблица 7. Изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы в зависимости от доли многолетних трав в севообороте и применения удобрений

Доля многолетних трав, %	Вариант системы удобрения	Гумус, %			P ₂ O ₅ , мг/кг			K ₂ O, мг/кг		
		Ротация								
		1-я	2-я	3-я	1-я	2-я	3-я	1-я	2-я	3-я
28	Исходное состояние	1.90			255			120		
	1. Без удобрений	2.23	2.01	2.00	232	176	194	122	78	72
	2. Навоз 36 т/га	2.26	2.21	1.98	226	191	219	128	77	81
	3. Навоз + N30P60K60	2.08	2.02	1.74	246	236	165	130	100	92
	4. Навоз + N60P120K120	2.08	2.17	1.80	475	320	156	206	167	163
	5. N30P60K60	—	2.15	1.83	—	202	156	—	90	96
50	Исходное состояние	2.06			286			132		
	1. Без удобрений	2.14	2.19	1.79	243	288	183	140	114	88
	2. Навоз 36 т/га	2.28	2.19	2.05	250	244	178	132	86	79
	3. Навоз + N30P60K60	2.24	2.10	1.85	240	282	160	144	89	131
	4. Навоз + N60P120K120	2.10	2.17	1.93	251	299	212	144	100	136
	5. N30P60K60	2.24	2.18	1.98	200	254	170	120	80	119

нии в травяном звене смеси клевера и люцерны в течение 3-х лет удавалось удерживать содержание обменного кальция в почве в пределах 8.7–9.8 мг-экв/100 г или на 12–26% больше исходного уровня, а также поддерживать невысокий темп снижения содержания обменного магния, концентрация которого в годы исследования в зависимости от вариантов варьировала в диапазоне 0.5–0.9 мг-экв/100 г или была меньше исходного на 0.04–0.4 мг-экв/100 г (на 4–43%) (табл. 6). Отмеченные особенности многолетней динамики содержания обменных оснований в изученном севообороте могли быть обусловлены более выраженной мобилизацией Ca и Mg из необменных форм за счет корневых экссудатов и биологическим переносом их из нижней части корнеобитаемого слоя вверх доминирующей в травостое люцерной, обладающей более мощной и глубже проникающей в сравнении с клевером корневой системой.

Таким образом, в вариантах систем удобрения, обеспечивших продуктивность севооборотов максимального или близкого к нему уровня, отмечена тенденция к ухудшению кислотно-основных свойств пахотного слоя почвы, проявившаяся в снижении показателей pH_{KCl} на одну градацию: от близкой к нейтральной к нижней границе слабокислого интервала, а также в увеличении показателя гидролитической кислотности со среднегодовой за 18 лет скоростью 0.048–0.086 мг-экв/100 г. Это, тем не менее, не приводило к уменьшению урожайности культур и продуктивности севооборотов. Снижалась также концен-

трация обменных оснований, причем наиболее заметно в севообороте с меньшей долей многолетних трав, что свидетельствовало о необходимости проведения поддерживающего известкования в конце каждой ротации севооборотов.

Независимо от насыщения севооборотов многолетними травами, в течение первых 2-х ротаций отмечали хорошо выраженную положительную динамику содержания гумуса в почве во всех вариантах с удобрениями, включая контроль. К концу 2-й ротации севооборотов с 17–33- и 50%-ной долей трав содержание гумуса в почве в вариантах удобрения увеличилась с 1.9 и 2.06% в исходном состоянии до 2.01–2.21 и 2.10–2.19% или на 0.11–0.31 и 0.04–0.13% соответственно. Однако к концу 3-й ротации, очевидно вследствие существенного роста доз азотных и калийных удобрений, обеспечивших повышение урожайности культур зернового звена севооборотов, с одной стороны, и увеличение темпов нитрификации — с другой, наметилась тенденция к снижению гумусированности пахотного слоя. При этом в вариантах органо-минеральной системы удобрения содержание гумуса в почве в севообороте с меньшей долей трав было меньше исходного уровня на 1.10–0.16% и было равно 1.74–1.80%. В вариантах органической системы и в неудобренном контроле оно все же превышало последний показатель на 0.10–0.12% (табл. 7).

В севообороте с 50%-ной долей многолетних трав в этот период содержание гумуса в почве на исходном уровне поддерживалось только в вари-

анте органической системы удобрения. В остальных вариантах отмечено уменьшение его содержания до 1.79–1.98% или на 0.27–0.08% от исходного.

Следовательно, при максимальной продуктивности изученных севооборотов, равной 3.0–4.0 т з.е./га в год, обеспечившие ее органо-минеральные системы удобрения не способствовали поддержанию содержания гумуса в почве в пределах исходных показателей или его увеличению. При их использовании необходимо проведение дополнительных мероприятий по повышению объемов поступления органического вещества в пахотный слой, например, посев пожнивных сидератов семейства капустных в зерновых звеньях севооборотов [17]. Этого не требуется при использовании органической системы удобрения, которая обеспечила формирование 80–99% продуктивности севооборотов от достигнутого максимума и способствовала, как минимум, сохранению содержания гумуса в почве на исходном или несколько более высоком уровне.

Отмеченные особенности многолетней динамики содержания гумуса в почве в севооборотах с 28- и 50%-ной долей многолетних трав, представленных соответственно клевером луговым 1–2-х лет пользования и клеверно-люцерновой травосмесью 3-х лет пользования в изученных вариантах систем удобрения, как правило, находились в соответствии с изменениями общей биологической активности и активности почвенных ферментов, отражающих процессы минерализации и новообразования свежего органического вещества.

При этом биологическая активность почвы, определяемая по интенсивности выделения CO_2 , в сравнении с контролем увеличилась в среднем за 3 ротации севооборотов на 8–13 и 10–16% соответственно. Активность каталазы, характеризующей интенсивность окислительных процессов в слое 0–20 см почвы, к концу 1-й ротации севооборота с 28%-ной долей многолетних трав снижалась на 26–48%, а во 2-й ротации отмечали увеличение на 13–16% активности полифенолоксидазы, ответственной за новообразование гумусовых соединений. При более высоком насыщении севооборота травами степень активности этого фермента в конце 2-й ротации свидетельствовала о тенденции к усилению минерализационных процессов, которые, очевидно, преобладали в почве и во 2-й половине 3-й ротации, за исключением варианта органической системы удобрения (табл. 8).

При очень высокой исходной обеспеченности изученной почвы подвижным фосфором (VI группа) многолетняя динамика его содержания во всех вариантах обоих севооборотов, включая

контроль, заключалась в постепенном ее снижении от 1-й ротации к 3-й вследствие потребления растениями элемента на формирование урожая и частичной его иммобилизации почвенным поглощающим комплексом в формах, не извлекаемых стандартной вытяжкой.

Отмеченные изменения происходили главным образом в пределах V группы (высокая) по принятым градациям. Например, если в конце 1-й ротации севооборотов содержание P_2O_5 в почве изменялось в основном в пределах ее верхней границы (226–251 мг/кг), то к концу 3-й ротации оно уменьшилось до 156–219 мг/кг, все же оставаясь у нижней границы указанного диапазона. В оптимальном по продуктивности варианте органической системы удобрения содержание подвижного фосфора в почве составляло в этот период 180–220 мг/кг, что, по мнению [11], вполне способно обеспечить наиболее высокую урожайность сельскохозяйственных культур в условиях достаточного увлажнения, азотного и калийного питания (табл. 7).

Содержание подвижного калия в почве контрольного варианта в конце 1-й ротации севооборотов находилось в пределах повышенной обеспеченности и составляло 122 и 140 мг/кг, что было на 2 и 8 мг/кг больше исходного содержания. Во 2-й ротации севооборотов вследствие недостаточной влагообеспеченности в течение большинства вегетационных периодов (4 из 6), несмотря на заметное уменьшение продуктивности культур и соответственно — выноса K_2O урожаями, содержание подвижного калия в почве контроля снижалось до среднего и низкого уровней обеспеченности. Аналогичная динамика содержания подвижного калия в почве без удобрений сохранялась и в течение 3-й ротации, а в конце ее содержание подвижного калия составило 72 и 88 мг/кг соответственно. В оптимальном по продуктивности варианте органической системы, а также в варианте минеральной системы удобрения отмечали практически те же тенденции, наиболее выраженные в севообороте с меньшей долей многолетних трав.

В связи с вышеизложенными особенностями поведения подвижного калия в почве под влиянием внесенных удобрений и возделываемых культур, в последующем необходимо увеличить дозы соответствующих удобрений для достижения содержания K_2O оптимального уровня, характеризующегося повышенной обеспеченностью (IV группа) (табл. 7).

Таблица 8. Биологическая активность почвы в зависимости от удобрений в севооборотах с разным насыщением многолетними травами (1992–2010 гг., слой 0–20 см почвы)

Доля многолет- них трав, %	Вариант систем удобрения	Общая биологическая активность почвы, (выделение CO ₂ , мг/г/ч)			Активность ферментов (полифенолоксидаза), 1.4 <i>n</i> бензохинон, мг/г		
		Ротации севооборота					
		1-я	2-я	3-я	1-я*	2-я	3-я
17–33	1. Без удобрений	110	107	100	1.12	16.5	26.1
	2. Навоз 36 т/га	122	110	117	1.04	19.1	30.6
	3. Навоз + N30P60K60	117	126	118	0.69	18.6	20.4
	4. Навоз + N60P120K120	102	121	119	0.83	16.8	22.0
	5. N30P60K60	108	100	110	0.89	19.1	21.3
50	1. Без удобрений	100	128	110	—	25.0	22.0
	2. Навоз 36 т/га	124	138	119	—	21.8	33.5
	3. Навоз + N30P60K60	117	138	119	—	22.4	25.6
	4. Навоз + N60P120K120	117	135	109	—	20.2	28.2
	5. N30P60K60	112	122	92	—	20.6	20.6

*Активность каталазы, мл O_2 /г/мин.

ВЫВОДЫ

1. На окультуренной, известкованной дерново-подзолистой почве Центрального Нечерноземья с высокой обеспеченностью подвижным фосфором, повышенной — калием и близкой к нейтральной реакцией почвенной среды, ни одна из изученных систем удобрения без дополнительного известкования не способствовала поддержанию кислотно-основных свойств пахотного слоя в течение 3-х ротаций 6-польных зернокармликовых севооборотов с 28- и 50%-ным насыщением многолетними травами, на благоприятном для сельскохозяйственных культур уровне.

2. Среднегодовая за 18 лет скорость снижения величины $\text{pH}_{\text{КСИ}}$ и повышения гидролитической кислотности в севообороте с 28%-ной долей многолетних трав в зависимости от вариантов удобрения составляла 0.022–0.044 ед. и 0.048–0.109 мг-экв/100 г, в севообороте с 50%-ным насыщением — 0.44–0.072 ед. и 0.028–0.083 мг-экв/100 г соответственно. Уменьшение содержания обменных кальция и магния от начала к концу исследования, наиболее выраженное в севообороте с меньшей долей трав, составило соответственно 1.1–1.6 и 0.53–0.81 мг-экв/100 г в среднем в год.

3. Из всех вариантов удобрения только органическая система (последствие навоза 36 т/га) поддерживала содержание гумуса в почве обоих севооборотов на уровне, близком к исходному при среднегодовом сборе зерновых единиц (з.е.) 2.77 и 3.18 т/га, сырого протеина — 6.04 и 8.23 ц/га,

накопление обменной энергии — 42.1 и 54.8 ГДж/га соответственно в севооборотах или 90–95 и 79–99% от достигнутых максимальных показателей. Эту систему удобрения следует считать оптимальной в конкретных условиях возделывания.

4. Максимальный сбор зерновых единиц, сырого протеина и энергии, равных в севообороте с меньшей долей трав 2.99 т/га, 6.37 ц/га и 44.4 ГДж/га, в севообороте с высокой долей — 4.03 т/га, 8.26 ц/га и 54.4 ГДж/га или на 10–14 и 5–38% больше неудобренного контроля, создавался соответственно среднегодовыми дозами N22.2P23.3K33.3 и N33.9P40K55 на фоне последствие навоза 36 т/га, внесенного в начале 1-й ротации.

5. При продуктивности севооборотов, близкой к достигнутым максимумам в варианте органической системы удобрения, для поддержания кислотно-основных свойств почвы и содержания подвижного фосфора и калия в пахотном слое в благоприятном для сельскохозяйственных культур диапазоне, необходимо проведение известкования в каждой ротации севооборотов дозами, рассчитанными по гидролитической кислотности и внесение фосфорно-калийных удобрений под зерновые культуры в дозах, способствующих повышению содержания P_2O_5 и K_2O до оптимального уровня, соответствующего IV–V группам обеспеченности по принятым градациям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлыстовский А.Д. Плодородие почвы при длительном применении удобрений и извести. М.: Наука, 1992. 192 с.
2. Никитишен В.И. Агрохимические основы эффективного применения удобрений в интенсивном земледелии. М.: Наука, 1984. 136 с.
3. Расширенное воспроизводство плодородия почв в интенсивном земледелии Нечерноземья / Под ред. Милащенко Н.З. М., 1993. 864 с.
4. Лукин С.М. Ресурсы органического вещества и пути его регулирования в пахотных почвах Нечерноземной зоны // Ресурсы органического вещества и пути его регулирования. Мат-лы научн.-практ. конф. 26 февраля 2004 г. Киров, 2004. С. 27–31.
5. Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А. Итоги агрохимических исследований на серых лесных почвах Владимирского Ополя // Результаты длительных исследований в системе Географической сети опытов с удобрениями Российской Федерации (к 70-летию Геосети). М., 2011. С. 176–202.
6. Завалин А.А., Соколов О.А. Потоки азота в агроэкосистеме: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней. М.: ВНИИА, 2016. 591 с.
7. Агробιοгеохимический цикл фосфора / Под ред. Иванова А.Л. М., 2012. 512 с.
8. Сычев В.Г. Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования. М., 2019. 324 с.
9. Прокошев В.В., Дерюгин И.П. Калий и калийные удобрения. М.: Ледум, 2000. 185 с.
10. Кирпичников Н.А., Адрианов С.Н. Действие и последствие фосфорных удобрений на дерново-подзолистой почве при различной степени известкования // Агрохимия. 2007. № 10. С. 1–11.
11. Прудников В.А. Кислотный, фосфорный и калийный режимы дерново-подзолистой почвы. Минск, 2015. 152 с.
12. Сычев В.Г., Лепешкин В.В. Методические указания по оценке качества и питательности новых видов кормов. М.: ВНИИА, 2009. 64 с.
13. Штатнов В.И. К методике определения биологической активности почвы // Докл. ВАСХНИЛ. 1952. № 6. С. 27–33.
14. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Звягинцева Д.Г. М.: Изд-во МГУ, 1980. 223 с.
15. Федеральный регистр технологий производства продукции растениеводства. Система технологий. М.: Информагротех, 2000. 515 с.
16. Доспехов Б.А. Планирование полевого опыта и статистическая обработка данных. М., 1985. 351 с.
17. Лошаков В.Г. Зеленые удобрения в земледелии России. М.: ВНИИА, 2015. 300 с.

Efficiency and Optimization of Fertilizer Systems in Crops Rotations with Different Performance of Perennial Grasses on the Sod-Podzolic Soil of the Center of the Non-Black-Zone of Russia

V. V. Kononchuk^{a, #}, V. D. Shtyrkhunov^a, G. V. Blagoveshchensky^a,
S. M. Tymoshenko^a, and T. O. Nazarova^a

^a Federal Research Center “Nemchinovka”

ul. Agrochimikov 6, Moscow Region, Odintsovo District, r.p. Novoivanovsky 143026, Russia

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

On the calcareous sod-podzolic soil of the Central Non-chernozem soil with a very high supply of arable layer of mobile phosphorus, increased potassium, close to a neutral reaction of the medium and a humus content of 1.9–2.06% organic fertilizer system (manure 36 t/ha aftereffect) ensured the average annual over 18 years of collecting grain units in 6-field grain-crop crop rotation with 28% and 50% of perennial leguminous grasses at the level of 2.8–3.2 t/ha, the accumulation of crude protein and metabolic energy 6.04 and 8.23 c/ha, 42.1 and 54.8 GJ/ha or 80–99% of the achieved maximum value, and based on 1 kg grain unit (g.u.) – 218 and 259 g, 15.2–17.2 MJ, respectively. In this case, the humus content in the soil remained at the initial or somewhat higher level by the end of the study. The content of mobile phosphorus and potassium decreased over 18 years by one or two gradations of security (from VI to V and from IV to II), which suggests an additional application of phosphorus and potassium fertilizers in doses calculated to maintain the concentration of P₂O₅ and K₂O in the soil in the optimal range (IV–V security groups according to accepted gradations). In order to reduce the negative effects of acidification of the soil, the average annual rate for 18 years of which was 0/039 and 0/067 units. pH_{KCl} substantiates the need for supporting liming.

Key words: Non-chernozem, sod-podzolic soil, crop rotation, perennial grasses, fertilizer, productivity, fertility.