

УДК 631.582:631.445.24:631.81:631.412

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОЙ И ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНОЙ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ НА УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ТЯЖЕЛОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ

© 2022 г. А. А. Коваленко^{1,*}, Т. М. Забугина¹, А. А. Завалин¹, С. Н. Сапожников¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

*E-mail: kovalhud@mail.ru

Поступила в редакцию 05.03.2022 г.

После доработки 20.03.2022 г.

Принята к публикации 15.04.2022 г.

В многолетнем стационарном полевом опыте на слабокультуренной тяжелосуглинистой почве на землепользовании Центральной опытной станции ВИУА (Московская обл., Домодедовский р-н) продуктивность 7-польного севооборота (викоовсяная смесь – озимая пшеница – клевер 1-го года пользования – озимая пшеница – картофель – ячмень – овес) и урожайность культур последовательно повышались от 1-й ротации к 4-й. Влияние извести на урожайность культур было незначительным. На бедной питательными веществами дерново-подзолистой почве из отдельных видов удобрений наиболее эффективным было фосфорное. В среднем за ротацию прибавка от применения Р40–46 составляла в 1-й ротации 6,9, во 2-й – 10,4 ц/га, в 3-й и 4-й при внесении Р69 – соответственно 9,5 и 12,5 ц к.е./га. Применение полного минерального удобрения в дозах N43P44K47 в среднем за год на фоне известкования повысило продуктивность севооборота на 10,1 ц к.е./га (с 16,7 до 26,8) в 1-й ротации и на 14,3 ц (с 18,6 до 32,9 ц к.е./га) – во 2-й, в 3-й ротации при дозе применения N77P69K77 – на 16,5 ц (с 23,2 до 39,7 ц к.е./га), в 4-й ротации при той же дозе удобрений – на 25,9 ц (с 25,6 до 51,5 ц к.е./га). К 4-й ротации эффективность отдельных видов удобрения выравнивалась. Одновременно с ростом урожайности культур и продуктивности севооборота от ротации к ротации повышалась окультуренность почвы. После прохождения 4-х ротаций севооборота под влиянием извести и удобрений почва из состояния слабокультуренной перешла в группу средней и повышенной. Наиболее высокая продуктивность севооборота отмечена при применении органо-минеральной системы удобрения при внесении навоза 40 т/га (11,4 т/га/год) и положительном балансе элементов питания.

Ключевые слова: севооборот, дерново-подзолистая слабокультуренная почва, окультуренность почвы, система удобрения, агрохимические показатели, баланс элементов питания.

DOI: 10.31857/S0002188122070080

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных вопросов агрохимии и земледелия в целом является эффективное и экономное использование удобрений и химических мелиорантов в целях достижения в конкретных агроклиматических условиях возможно высокой продуктивности сельскохозяйственных культур и поддержки или повышения плодородия почвы. В этой связи система применения удобрений должна предусматривать получение требуемого уровня урожайности сельскохозяйственных культур высокого качества, сохранение и повышение

плодородия почвы, охрану окружающей среды от загрязнения [1].

Оптимальное сочетание всех агроэкологических факторов в требуемых для сельскохозяйственных культур режимах (водного, теплового, воздушного) с учетом их биологических потребностей, почвенно-климатических и погодных условий, фитосанитарного состояния почв и посевов является одним из основных условий высокой продуктивности и устойчивости земледелия [2]. В современной земледелии удобрения являются важнейшим средством целенаправленного регулирования питания растений, круговорота и

баланса биогенных веществ, последовательного повышения плодородия и фитосанитарного состояния почв и получения на этой основе высокой продуктивности агроценозов и поддержания экологического равновесия в природе [3].

Исследователи отмечают [4], что несмотря на длительность процесса изучения эффективности удобрений, их влияния на плодородие почв и продуктивность культур, очень многие вопросы этой разноплановой проблемы не получили должного окончательного решения. Возникает необходимость теоретического обоснования и разработки систем удобрения, которые более адаптивны, менее энергоемки, экологически безопасны, разумно сочетают природные ресурсы и агротехнические приемы.

Решению некоторых вопросов изучения отзывчивости культур полевого севооборота на минеральную и органо-минеральную системы удобрения, их влиянию на показатели плодородия дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы в условиях длительного их применения служил стационарный полевой опыт на Центральной опытной станции ВИУА в Домодедовском р-не Московской обл. [5–7]. Перед закладкой опыта почва характеризовалась кислой реакцией среды при очень низком содержании подвижного фосфора и калия. Подобные почвы занимали в те годы $\approx 70\%$ всей пахотной площади Нечерноземной полосы РФ [5], значительные площади таких почв имеются и в настоящее время [8]. Таким образом, несмотря на удаленность приводимых материалов во времени, эти сведения не потеряли своей актуальности. Цель работы – установить влияние минеральной и органо-минеральной систем удобрения на фоне известкования кислой, бедной питательными веществами дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы, на урожайность культур и продуктивность полевого севооборота в течение длительного периода его прохождения, а также воздействие извести и удобрений на состояние плодородия почвы и баланс питательных веществ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Перед закладкой опыта в слое почвы в 0–20 см содержание гумуса (по Тюрину) составило 1.61–1.92%, P_2O_5 (по Кирсанову) – 21–30 мг/кг, K_2O (по Масловой) – 105–124 мг/кг, pH_{KCl} 4.2–4.3, $S_{основ}$ – 7.7–8.5 мг-экв/100 г почвы.

Опыт проводили в течение 4-х ротаций 7-польного севооборота. Севооборот включал зерновые, кормовые культуры и картофель. В опыте применяли N_{aa} , P_{ϕ} при основном внесении и $P_{ст}$ при по-

севе зерновых в рядки с семенами (1-, 2-я ротации) или $P_{ст}$ (3-, 4-я ротации), K_x и полуперепревший навоз КРС. Известковый материал – известняковая мука.

Сроки и способы внесения удобрений: под яровые зерновые – НРК- удобрения вносили весной под предпосевную культивацию; под озимую пшеницу – РК-удобрения, N_{20} – под плуг осенью, остальной азот – весной в подкормку; под картофель – весной под перепашку зяби, навоз осенью; под викоовсяную смесь – навоз осенью. Известь вносили под озимую пшеницу в предпосевную культивацию и под ячмень – осенью. Высеивали сорта сельскохозяйственных культур, районированные в те годы. Технология возделывания культур – типичная для зоны, совершенствовавшаяся с течением времени.

Опыт проводили в 4-х полях, повторность четырехкратная. Размещение вариантов внутри повторений – систематическое. Площадь опытной делянки 174 м², учетная – 100 м².

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Действие различных систем удобрения на урожайность культур и продуктивность севооборота в течение 4-х ротаций представлено в табл. 1, 2. Урожайность по годам значительно менялась (особенно в 1-й и 2-й ротациях) в зависимости от метеорологических условий, но закономерность действия удобрений сохранялась. Во 2-й и последующих ротациях урожайность викоовсяной смеси, озимой пшеницы и ячменя в большинстве вариантов, включая контроль, последовательно повышалась по сравнению с 1-й ротацией в связи с ростом окультуренности почвы. Урожайность картофеля повышалась от 1-й ротации ко 2-й, в 3-й ротации находилась на уровне, близком урожайности во 2-й ротации, затем снова повышалась в 4-й ротации. Продуктивность севооборота, как обобщающий показатель эффективности удобрений, последовательно возрастала от 1-й ротации к 4-й также во всех вариантах опыта.

Влияние извести на урожайность культур оказалось незначительным, наиболее значимым для озимой пшеницы, идущей после клевера. В целом за севооборот прибавки от извести по сравнению с фоном без удобрений от 1-й к 3-й ротации составили: 1.8, 2.8 и 2.9 ц к.е./га, на фоне минеральных удобрений (вариант 7) соответственно – 1.2, 1.3, 2.0 ц к.е./га (отметим, в 4-й ротации известь вносили общим фоном во всех вариантах). Из сочетаний минеральных удобрений наиболее эффективными были системы с наличием в их составе фосфора: НР, РК, НРК. Например, в 1-й ротации прибавки продуктивности соответ-

Таблица 1. Динамика урожайности культур и продуктивность севооборота по ротациям, ц к.е./га

Вариант, №	Викоовсяная смесь				Озимая пшеница 1				Озимая пшеница 2				Картофель				Ячмень				Продуктивность, ц к.е./га			
	ротации																							
	1-я	2-я	3-я	4-я	1-я	2-я	3-я	4-я	1-я	2-я	3-я	4-я	1-я	2-я	3-я	4-я	1-я	2-я	3-я	4-я	1-я	2-я	3-я	4-я
1	11.0	15.7	27.1	26.6	6.5	6.5	14.8	18.3	11.7	12.8	13.8	20.1	103	105	90	110	11.9	16.1	16.3	19.2	14.9	15.8	20.3	23.3
2	11.9	18.2	26.7	28.4	7.7	7.6	17.6	21.3	15.2	15.6	17.2	22.1	103	114	97	120	11.9	17.1	17.0	20.2	16.7	18.6	23.2	25.6
3	16.2	29.7	47.3	39.3	20.8	17.1	26.4	30.5	25.9	26.2	25.5	30.8	129	179	125	198	15.4	22.1	24.2	32.2	24.7	29.5	32.3	37.3
4	14.8	18.8	39.9	41.2	9.9	9.9	23.9	31.8	20.3	19.1	23.7	31.2	118	132	130	221	14.1	21.8	23.8	31.6	19.9	22.5	30.2	39.0
5	15.4	25.2	33.2	36.3	17.4	18.7	22.9	30.4	24.7	27.7	29.1	30.9	124	157	135	207	16.7	21.2	20.5	29.9	23.9	27.6	30.9	37.1
6	17.3	32.7	50.6	54.0	22.3	23.8	32.4	42.4	28.9	31.6	33.4	42.6	138	181	179	282	17.6	26.5	30.3	43.9	26.8	32.9	39.7	51.5
7	17.9	32.2	49.5	50.8	22.4	23.6	31.8	41.4	25.8	30.1	29.8	40.5	137	188	178	268	18.6	26.5	30.5	41.9	25.6	31.6	37.7	49.1
18	19.5	32.1	53.7	55.9	28.0	23.8	31.2	43.4	27.9	30.3	33.6	45.5	163	203	200	321	19.3	27.8	28.6	41.9	29.6	33.5	41.8	54.1
10	21.2	33.6	54.7	58.9	25.9	21.1	33.0	46.1	24.0	24.3	33.9	48.0	168	214	202	362	16.7	27.1	30.1	44.9	28.6	32.0	42.5	58.5
к.е., ц/га	2.9	6.4	7.5	8.8	3.6	4.2	3.4	3.3	2.8	3.8	3.6	4.1	17	23	26	30	2.6	3.1	3.4	3.2	—	—	—	—

Примечания. 1. Системы удобрения соответствуют вариантам: 1 – фон без удобрений, 2 – фон Са, 3 – Са + NP, 4 – Са + NK, 5 – Са + PK, 6 – Са + NPK, 18 – Са + навоз одинарная доза + NPK по балансу, 10 – Са + навоз двойная доза + NPK в 3-й и 4-й ротациях. Дозы удобрений: азот в 1-й ротации – 43, во 2-й – 51, в 3-й и 4-й – 77 кг/га (среднее за год); фосфор в 1-й и 2-й ротациях – 44, в 3-й и 4-й – 77 кг/га; одинарная доза навоза в 1-й – 3-й ротациях – 5.7 т/га, в 4-й ротации – 11.4 т/га; доза извести в 1-й, 2-й и 3-й ротациях – 4 т/га за ротацию, в 4-й ротации – 8 т/га. 2. Нумерация вариантов та же в табл. 2–4.

Таблица 2. Эффективность минеральной и органо-минеральной систем удобрения (прибавки урожайности) в ротациях севооборота, ц/га

Вариант, №	Викоовсяная смесь				Озимая пшеница 1				Озимая пшеница 2				Картофель				Ячмень				Продуктивность, ц к.е./га			
	ротации																							
	1-я	2-я	3-я	4-я	1-я	2-я	3-я	4-я	1-я	2-я	3-я	4-я	1-я	2-я	3-я	4-я	1-я	2-я	3-я	4-я	1-я	2-я	3-я	4-я
3	4.3	11.0	20.6	10.9	13.1	9.5	8.8	9.2	10.7	10.6	8.3	8.7	26	65	28	78	3.5	5.0	7.2	12.0	8.0	10.9	9.1	11.7
4	2.9	0.1	13.2	12.8	2.2	2.3	6.3	10.5	5.1	3.5	6.5	9.1	15	18	33	101	2.2	4.7	6.8	11.4	3.2	3.9	7.0	13.4
5	3.5	6.5	6.5	7.9	9.7	11.1	5.3	9.1	9.5	12.1	11.9	8.8	21	43	38	87	4.8	4.1	3.5	9.7	7.2	9.0	7.7	11.5
6	5.4	14.0	23.9	25.6	14.6	16.2	14.8	21.1	13.7	16.0	16.2	20.5	35	67	82	162	5.7	9.4	13.3	11.7	10.1	14.3	16.5	25.9
7	6.9	16.5	22.4	24.2	15.9	17.1	17.0	23.1	14.1	17.3	16.0	20.4	34	83	88	158	6.7	10.4	14.2	22.7	10.7	15.8	17.4	25.8
18	7.6	13.9	27.0	27.5	20.3	16.2	13.6	22.1	12.7	14.7	16.4	23.4	60	89	103	201	7.4	10.7	11.6	21.7	12.9	14.9	18.6	28.5
10	9.3	15.4	28.0	36.5	18.2	13.5	15.4	24.8	8.8	8.7	16.7	25.9	65	100	105	242	4.8	10.0	13.1	24.7	11.9	13.4	19.3	32.9

Примечание. Прибавки урожайности и продуктивности севооборота в варианте 7 (NPK) отдельных культур и ротаций более значительны чем в варианте 6 (Са + NPK), хотя урожайность первых несколько меньше. Это связано с различным уровнем контролей: для варианта 6 контролем был вариант 2 (фон Са), для варианта 7 – вариант 1 (фон без удобрений).

Прибавки даны по отношению к фону извести, за исключением варианта 7, которая рассчитана по отношению к абсолютно-му контролю.

ственно составляли: 8.0, 7.2 и 10.1 ц к.е./га. Сочетание НК обеспечивало прибавку лишь 3.2 ц к.е./га. Таким образом, на бедной по содержанию подвижного фосфора почве полевые культуры испытывали первоочередную потребность в фосфоре, именно фосфор находился в первом сильно выраженном минимуме [5, 6]. В среднем за ротацию прибавка от фосфора в дозе 40–46 кг/га составляла 6.9 ц к.е./га в 1-й, 10.4 – во 2-й ротации,

при дозе P69–9.5 ц в 3-й и 12.5 ц к.е./га – в 4-й ротации.

Применение полной минеральной системы в дозе N43P44K47 в среднем за год 1-й и 2-й ротаций на фоне известкования позволило поднять продуктивность севооборота с 16.7 до 26.8 ц к.е./га в 1-й и с 18.6 до 32.9 ц к.е./га во 2-й ротации, в 3-й ротации при дозе N77P69K77 – с 23.2 до

39.7 ц к.е./га. В 4-й ротации, в результате окультуривания почвы в течение 3-х ротаций, на первое место по эффективности выходили азотное и калийное удобрения, несколько уступало им фосфорное. Прибавка от N77 составляла 14.4, P69–12.5, K77–14.2 ц к.е./га, или на 1 кг азота – 18.7, фосфора – 18.1, калия – 18.5 к.е., т.е. эффективность разных видов удобрений практически выравнивалась. Органо-минеральные системы еще более повышали урожайность культур и продуктивность севооборота. Система удобрения, рассчитанная по балансу, обеспечивала продуктивность от 29.6 ц в 1-й ротации до 33.5 ц – во 2-й, 41.8 ц – в 3-й и 54.1 ц к.е./га – в 4-й ротации. Система удобрения с двойной дозой навоза + NPK (вариант 10) имела продуктивность в 3-й ротации, равную 42.5, в 4-й – 58.5 ц к.е./га.

По мере прохождения ротаций севооборота вместе с ростом продуктивности культур под влиянием удобрений изменялись агрохимические показатели почвы (табл. 3). Содержание гумуса (по Тюрину) снижалось от исходного уровня при всех системах удобрения, наиболее сильно во 2-й ротации севооборота. По окончании 3-й ротации севооборота отмечено незначительное увеличение содержания гумуса по сравнению со 2-й ротацией, причем не только в вариантах с удобрениями (это можно объяснить увеличением доз в 1.5 раза в 3-й ротации). Но даже в контроле без удобрений различий между содержанием гумуса на фоне без удобрений и на фоне внесения Са между 1-й и 2-й ротациями не отмечено. При применении парных сочетаний удобрений более высокое содержание гумуса отмечено в варианте НК, а также в варианте NPK без Са. Наиболее высокие показатели содержания гумуса наблюдали при применении органо-минеральных систем. В 4-й ротации содержание гумуса в большинстве вариантов находилось на уровне показателей за 3-ю ротацию, а в варианте органо-минеральной системы с двойной дозой навоза (вариант 10) – даже близкие исходной величине. Содержание подвижного фосфора по Кирсанову в контроле и в вариантах без внесения фосфорного удобрения имело тенденцию к повышению от исходного уровня в 4-й ротации, через некоторое его понижение в 1-й и 2-й ротациях. В вариантах с фосфорным удобрением в составе содержание подвижного фосфора в почве от ротации к ротации повышалось, причем наиболее значительно в варианте РК (что, вероятно, было связано с меньшим потреблением фосфора на формирование урожая, чем в вариантах NP и NPK). Наиболее высокое содержание подвижного фосфора отмечено в варианте органо-минеральной системы с двойной дозой навоза (вариант 10) – 128 и 126 мг/кг в 3-й и 4-й ротациях соответственно. Отметим,

что это происходило при формировании самой высокой продуктивности севооборота – 58.8 ц к.е./га в 4-й ротации.

Несмотря на достаточно большой вынос фосфора в вариантах без внесения фосфорных удобрений (варианты 2, 4) – 374 и 446 кг/га, содержание подвижного фосфора в почве в 4-й ротации не уменьшилось, а даже несколько возросло. Отмеченное явление, возможно, было обусловлено влиянием внесенной извести, а также повышением подвижности фосфора за счет менее растворимых почвенных фосфатов [5]. В вариантах с использованием в составе удобрения фосфора (варианты 3, 5–7) содержание подвижного фосфора в почве от ротации к ротации последовательно возрастало. Наибольший прирост за 4 ротации получен в варианте 5 (PK) – 85 мг/кг, несколько меньший – в варианте 3 (NP) – 65 мг/кг. Полное минеральное удобрение на фоне Са (вариант 6) имело некоторое преимущество перед вариантом NPK без Са: 74 и 56 мг P₂O₅/кг соответственно. Наиболее высокие прибавки содержания подвижного фосфора получены при применении органо-минеральной системы: вариант 18 – 80, вариант 10 – 102 мг/кг почвы в слое 0–20 см. За 4 ротации севооборота по содержанию подвижного фосфора почва перешла в группу среднего и повышенного содержания. Следует обратить внимание, что от внесенного за 4 ротации количества фосфора с удобрениями растения использовали только менее половины: в варианте NP – 37, PK – 39, NPK – 44, органо-минеральной системы (вариант 18) – 36%. Другая часть внесенного фосфора влияла на повышение потенциально плодородия почвы.

Содержание обменного калия (по Масловой) в вариантах без внесения калийного удобрения (варианты 1–3) в 4-й ротации по сравнению с исходным уровнем снижалось, хотя и не последовательно во всех ротациях. В вариантах с внесением калийного удобрения (варианты 4–7) в итоге за 4 ротации его содержание в почве оставалось на уровне, близком к исходному. Заметное повышение содержания обменного калия наблюдали только в варианте 10 с удвоенной дозой навоза в 3-й и 4-й ротациях (NPK + двойная доза навоза): со 116 до 172 мг K₂O/кг.

Реакция почвенной среды (рН_{KCl}) без внесения извести (варианты 1, 7) не изменялась от исходной величины до конца 3-й ротации (в 4-й ротации известь внесли фоном во всех вариантах). Уже после 1-й ротации почва под влиянием извести из группы сильнокислых перешла в группу среднекислых почв. Применение полной минеральной системы удобрения без извести приводило к незначительному подкислению почвы. При совместном внесении извести и минеральных

Таблица 3. Динамика агрохимических показателей почвы в ротациях севооборота, среднее для 4-х полей в 1-й–3-й ротациях, для 3-х полей в 4-й ротации, слой 0–20 см

Вариант, №	Гумус, %					P ₂ O ₅ , мг/кг					K ₂ O, мг/кг					pH _{KCl}				S _{осн} , мг-экв/100 г					
	Ротации																								
	Исходное	1-я	2-я	3-я	4-я	Исходное	1-я	2-я	3-я	4-я	Исходное	1-я	2-я	3-я	4-я	Исходное	1-я	2-я	3-я	4-я	Исходное	1-я	2-я	3-я	4-я
1	1.61	1.57	1.38	1.48	1.43	26	23	19	26	29	117	116	94	120	91	4.2	4.2	4.2	4.4	5.2	8.4	8.5	9.0	9.3	10.7
2	1.81	1.61	1.42	1.49	1.45	24	21	21	31	32	114	106	91	108	86	4.3	4.7	5.2	5.3	5.7	8.3	9.9	10.7	11.1	12.4
3	1.73	1.58	1.42	1.56	1.54	30	47	60	98	95	121	107	86	99	80	4.3	4.7	5.1	5.2	5.5	8.5	10.4	11.0	11.0	12.1
4	1.77	1.60	1.43	1.59	1.58	28	25	24	30	39	124	144	127	166	122	4.3	4.7	5.1	4.9	5.4	8.4	9.6	10.4	10.1	11.4
5	1.91	1.67	1.44	1.52	1.57	27	51	65	104	112	117	138	119	146	116	4.2	4.6	5.2	5.3	5.7	8.5	10.7	11.1	11.5	12.7
6	1.77	1.57	1.41	1.56	1.61	24	30	65	91	98	117	127	129	153	122	4.2	4.7	5.1	5.0	5.5	7.7	9.5	10.5	10.5	11.6
7	1.72	1.56	1.45	1.61	1.57	24	41	56	82	80	105	134	132	162	120	4.2	4.2	4.2	4.2	5.0	8.2	7.9	8.4	8.7	10.8
18	1.82	1.72	1.45	1.67	1.66	21	32	49	94	101	117	133	131	148	120	4.2	4.7	5.4	5.3	5.7	8.0	10.4	11.7	11.3	12.7
10	1.78	1.79	1.53	1.80	1.78	24	32	31	128	126	116	138	141	186	172	4.2	5.0	5.4	5.4	5.8	8.2	10.8	11.4	12.5	13.0

Примечание. Дозы удобрения в вариантах 1–7 в сумме за ротацию: 1-я ротация – N300P305K330, 2-я ротация – N350P320K360, 3-я, 4-я ротации – N540P480K540, навоз – 1-я–3-я ротации – одинарная доза 40 т/га, двойная доза 80 т/га, 4-я ротация – 80 и 160 т/га, известь – 1-я–3-я ротации – 4 т/га, 4-я ротация – 8 т/га.

удобрений в вариантах применения всех систем удобрения положительное действие извести перекрывало отрицательное влияние физиологически кислых минеральных удобрений.

В среднем в вариантах с внесением извести за 1-ю ротацию кислотность почвы снизилась: pH_{KCl} повысился на 0.5 ед., гидролитическая и обменная кислотность также снижались. В 3-й ротации отмечена стабилизация показателей кислотности в вариантах по сравнению со 2-й ротацией севооборота. В 4-й ротации при удвоении дозы извести (8 т/га) и ее внесении общим фоном заметно снизилась по сравнению с 3-й ротацией все виды кислотности: pH_{KCl} в среднем повысился на 0.05 ед., H_г снизилась на 0.09 мг-экв/100 г. По показателям кислотности почва перешла в группу слабокислых, а в отдельных вариантах 2, 10, 18 – в близкую к нейтральной. Сумма поглощенных оснований за 4 ротации севооборота в среднем при внесении извести повысилась от 8.2 до 12.3 мг-экв/100 г, степень насыщенности почвы основаниями – от 64.0 до 86.6%. По этим показателям почва перешла из группы слабокультуренных в группу хорошо окультуренных почв. Зависимость урожайности изученных культур и продуктивности севооборота от комплекса агрохимических показателей (pH, содержания гумус, подвижных P₂O₅, K₂O, S_{осн}) характеризовалась средним уровнем тесноты связи. Коэффициенты множественной корреляции в ротациях севооборота составили: за 1-ю ротацию – 0.79, 2-ю – 0.51, 3-ю – 0.70, 4-ю – 0.64.

Наряду с изучением влияния систем удобрения в севообороте на урожайность сельскохозяйственных культур, продуктивность севооборота и агрохимические свойства почвы в опыте рассчитаны балансы элементов питания в ротациях севооборота (табл. 4).

При составлении азотного баланса за 1-ю ротацию было принято включать в расходную статью азота только вынос азота урожаем небобовых культур, включая в их число викоовсяную смесь на сено, а также 1/3 общего содержания азота в урожае зерна и соломы гороха. Вынос азота из почвы с урожаем клевера включал вынос этого элемента и сорняками. Количество биологически связанного азота под клевером было принято равным 2/3 его общего содержания в чистом клеверном сене, пожнивных и корневых остатках (без сорняков) [5]. Баланс фосфора и калия определяли по разности между поступлением их с удобрениями и выносом урожаями. Было установлено, что наиболее высокие размеры дефицита по тем элементам, которые не вносили с удобрениями, получены в вариантах парных сочетаний удобрений. При прохождении 1-й ротации севооборота дефициты элементов, не внесенных с удобрениями, заметно превышали таковые по сравнению с вариантом без удобрений. В 1-й ротации эти среднегодовые дефициты отдельных элементов питания растений составляли: азота – 26.1, фосфора – 10.6 и калия – 36.0 кг/га.

Баланс питательных веществ при внесении полного минерального удобрения (варианты 6, 7)

Таблица 4. Динамика баланса питательных веществ за 4 ротации севооборота (опыт СШ-1, 1-я–3-я ротации – среднее для 4-х полей, 4-я ротация – среднее для 3-х полей)

Вариант, №	Баланс элементов питания в ротациях, кг/га					
	ротации севооборота					
	1-я			2-я		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	-112	-60	-180	-44	-62	-186
2	-130	-70	-209	-65	-78	-215
3	+95	+203	-251	+81	+191	-310
4	+129	-74	+69	+140	-85	+13
5	-183	+192	+42	-111	+198	-18
6	+76	+202	+40	+53	+181	-96
7	+90	+202	+53	+75	+192	-70
9	+46	+39	-64	+45	+25	-11
18	+132	+218	+57	+54	+195	+71
10	+224	+154	+105	+152	+132	+225

Вариант, №	Баланс элементов питания в ротациях, кг/га						Баланс за 4 ротации, кг/га		
	3-я			4-я					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	-21	-82	-234	-49	-115	-251	-184	-319	-861
2	-89	-98	-233	-42	-128	-263	-148	-374	-920
3	+293	+329	-288	+236	+276	-354	+705	+1000	-1203
4	+359	-108	+143	+222	-179	+32	+850	-446	+257
5	-86	+306	+174	-76	+272	+78	-284	+968	+276
6	+259	+304	+69	-161	+196	-123	+549	+883	-110
7	+197	+325	+70	-141	+208	-82	+503	+937	-29
9	-170	-25	-36	-147	+45	+129	-408	+84	+18
18	+432	+411	+239	+307	+395	+133	+925	+1219	+500
10	+603	+521	+696	+537	+587	+767	+1516	+1394	+1794

Примечание. Расчет накопления азота пожнивными-корневыми остатками клевера в 1-й и 2-й ротациях проводили по фактическим сведениям, в 3-й и 4-й ротациях – равным 1/2 его содержания в надземной массе. Газообразные потери азота из удобрений приняты в размере 25%.

показал, что в бедной элементами питания почве значительная часть удобрений не использовалась на формирование урожая, а пошла на повышение потенциального плодородия и окультуривание почвы. Например, в 1-й ротации севооборота избыток фосфора, внесенного с минеральными удобрениями, превышал вынос его урожаями за ротацию в 2 раза (202 кг P₂O₅ против 103 кг) или составлял 28.8 кг P₂O₅ в среднем за год. Для азота этот избыток составлял уже 1/3 часть выноса урожаями, калия – немногим >1/7 его общего выноса.

Баланс питательных веществ при применении органической системы удобрения при внесении навоза 40 т/га за 1-ю ротацию (вариант 9) сложился положительным только для азота и фосфора, а для калия оказался отрицательным, хотя и незначительным по своим размерам: +6.6 кг N/га, +5.6 кг

P₂O₅/га и -9.1 кг K₂O/га в среднем за год. Удвоение дозы навоза до 80 т/га (вариант 10) обеспечило положительный баланс уже всех 3-х элементов питания, причем превышение поступления над выносом достигало значительных величин: 32 кг N/га, 22 кг P₂O₅/га и 15 кг K₂O/га в среднем за год.

При применении органо-минеральной системы, рассчитанной на получение заданных урожаев (вариант 18), также сложился положительный баланс всех 3-х элементов питания, и особенно с большим избытком фосфора над его выносом урожаями. Для азота этот избыток составлял ≈1/2, фосфора – 4/5 и калию – 1/6 общего выноса этих элементов питания урожаями.

Таким образом, результаты исследования баланса питательных веществ показали, что по

сравнению с минеральной системой удобрения при применении органо-минеральной системы относительный избыток элементов питания оказался несколько меньшим: для фосфора — 4/5 против 2, заметно большим для азота (1/2 против 1/3) и отчасти для калия (1/6 против 1/7). При этом растениеводческая продукция при применении минеральной системы удобрения была значительно меньшей, чем при применении органо-минеральной системы. Результаты изучения балансов питательных веществ в вариантах различных систем удобрения показали, что для существенного повышения урожаев всех культур в 1-й ротации севооборота на бедных в отношении содержания подвижных форм фосфатов дерново-подзолистых почвах недостаточно вносить удобрения, исходя из размеров выноса питательных веществ с планируемыми урожаями и обычных поправок к ним (–14 кг N, +4–6 кг P₂O₅ и +20–25 кг K₂O в среднем на 1 га в год).

В последующие ротации севооборота в соответствии с ростом урожайности культур и выносом элементов питания изменялись размеры баланса питательных веществ. Например, после 2-й и последующих ротаций севооборота увеличивался по сравнению с 1-й ротацией отрицательный баланс фосфора и калия в варианте без удобрений, а также в вариантах с парными сочетаниями элементов питания, в которых соответствующие удобрения не применяли и увеличивался положительный баланс в вариантах, где соответствующие удобрения были внесены. На фоне известкования без внесения удобрений (вариант 2) этот дефицит от 1-й ротации к последующим изменялся в среднем за год по-разному: фосфора — 10.0, 11.1, 14.0, 18.3 кг/га, калия — 29.9, 30.7, 33.3, 35.6 кг/га. При применении удобрений в вариантах с парными сочетаниями элементов дефицит элементов питания от ротации к ротации увеличивался следующим образом: фосфора — 10.6, 12.1, 15.4, 25.6 кг/га, калия — 35.9, 44.3, 41.1, 50.6 кг/га. Баланс азота в 1-й, 2-й и 4-й ротациях был дефицитным, причем в 1-й ротации — довольно значительным, в 3-й ротации он был небольшой и положительный. В среднем за год баланс азота составлял в ротациях на фоне известкования (вариант 2): –18.6, –6.3, +12.7, –7.0 кг/га. В варианте парного сочетания элементов без участия азота (вариант 5 — РК) баланс азота был следующим: –26.1, –15.9, +12.3, –10.9 кг/га. Небольшой положительный баланс азота, сложившийся в 3-й ротации, был связан со значительным повышением урожайности клевера и соответственно накоплением биологического азота в 3-й ротации по сравнению со 2-й ротацией.

В вариантах полной минеральной системы (варианты 6, 7) во всех ротациях севооборота сло-

жился положительный баланс азота и фосфора и небольшой отрицательный баланс калия во 2-й и 4-й ротациях. В варианте NPK + Ca (вариант 6) размеры баланса в среднем за год в ротациях составили: азота — 10.9, 7.6, 37.0, 23.0, фосфора — 28.9, 25.9, 43.4, 28.0, калия — –5.7, –13.7, 9.9, –17.6 кг/га.

В вариантах применения органической системы удобрения при внесении за 1-ю и 3-ю ротации навоза 40 т/га (вариант 9, в среднем за год 5.7 т навоза/га) сложился положительный баланс азота и фосфора и отрицательный — калия в 1-ю ротацию. Во 2-й ротации сформировался положительный баланс азота и фосфора, в 3-й ротации (в связи с ростом продуктивности) — отрицательный баланс фосфора и калия. В 4-й ротации, когда доза навоза была удвоена (80 т/га за ротацию или 11.7 т/га в среднем за год), сложился положительный баланс всех 3-х элементов питания. Размеры баланса от 1-й ротации к 4-й в среднем за год составляли: азота — +6.6, +6.4, +24.3, +21.0, фосфора — +5.6, +3.6, –3.6, +6.4, калия — –9.1, –1.6, –5.1, +18.4 кг/га.

При применении органо-минеральной системы, рассчитанной на получение планируемых урожаев (вариант 18) во всех ротациях севооборота для всех элементов питания балансы были положительными. Баланс при органо-минеральной системе удобрения во всех ротациях характеризовался следующими величинами: азота — 18.9, 7.7, 61.7, 43.9, фосфора — 31.1, 27.9, 58.7, 56.4, калия — 8.1, 10.1, 34.1, 19.0 кг/га (следует иметь в виду, что дозы минеральных удобрений в 3-й и 4-й ротациях были увеличены в 1.5 раза, а единичная доза навоза в 4-й ротации — в 2 раза). При внесении удвоенной дозы навоза (11.4 т/га в среднем за год в 1-й–3-й ротациях и 22.8 т/га — в 4-й ротации) совместно с полной минеральной системой (в 3-й и 4-й ротациях) во всех ротациях севооборота питательные вещества использовались растениями не полностью. Оставалось неиспользованным в среднем за год: азота — 32.0, 21.7, 86.1, 76.7, фосфора — 22.0, 18.9, 74.4, 83.9, калия — 15.0, 32.3, 99.4, 110 кг/га.

В сумме за 4 ротации севооборота дефицит на фоне без удобрений составил: азоту — –184, фосфора — –319, калия — –861 кг/га, на фоне известкования — соответственно –148, –374, –920 кг/га. При применении парных сочетаний элементов дефицит отсутствующего в удобрении элемента составил: азота — –284, фосфора — –446, калия — –1200 кг/га.

При применении минеральной системы удобрения на фоне известкования образовался небольшой дефицит калия, значительный избыток фосфора и в меньшей мере азота: N — +549, P₂O₅ — +883 (31.5 кг/га в год), K₂O — –110 кг/га.

При применении органической системы с единичной дозой навоза (5.7 т/га в год в 1-й и 3-й и 11.4 т/га – в 4-й ротациях, вариант 9) баланс азота был положительным (+408 кг/га или 14.6 кг в год), выявлен небольшой избыточный баланс фосфора (84 кг/га, 3.0 кг в год) и совершенно незначительный баланс калия (18 кг/га, 0.6 кг в год).

В вариантах органо-минеральной системы с единичной дозой навоза (5.7 т/га в год) в течение первых 3-х ротаций и с двойной дозой навоза (11.4 т/га) в 4-й ротации и единичной дозой NPK в 1-й и 2-й ротациях и полуторной дозой NPK в 3-й и 4-й ротациях (вариант 18) складывался положительный баланс всех 3-х элементов: азота – +925 (33.0 кг в среднем за год), фосфора – +1219 (43.5 кг в год) и калия – +500 кг/га (17.9 кг в год). Еще более значительный избыток элементов питания отмечен при применении системы удобрения с двойной дозой навоза (11.4 т в год в течение 3-х ротаций и 22.8 т – в 4-й ротации) и полуторной дозой NPK в 3-й и 4-й ротациях (вариант 10): азота – 1516 кг/га (54 кг в год), фосфора – 1394 кг (50 кг в год) и калия – 1794 кг (64 кг в год).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в полевом стационарном опыте показано, что урожайность викоовсяной смеси, озимой пшеницы и ячменя в полевом севообороте на исходно кислой, бедной элементами питания дерново-подзолистой почве последовательно повышалась от 1-й ротации 7-польного севооборота к 4-й ротации. Урожайность картофеля повышалась от 1-й ротации ко 2-й, в 3-й ротации находилась на уровне 2-й ротации, затем повышалась в 4-й ротации. Продуктивность севооборота последовательно возрастала во всех вариантах от 1-й к 4-й ротации. Действие извести на урожайность культур оказалось незначительным, наиболее значимым для озимой пшеницы, идущей в севообороте после клевера.

Из сочетаний минеральных удобрений в 1–3-й ротациях наиболее эффективными были системы с внесением фосфорного удобрения (NP, PK, NPK). Из отдельных видов удобрений ведущую роль играло фосфорное удобрение. В 4-й ротации различия эффективности отдельных видов минеральных удобрений были незначительными.

В пахотном слое почвы содержание гумуса снижалось от исходного состояния по мере прохождения 4-х ротаций севооборота при применении всех систем удобрения. Наиболее высокое содержание гумуса отмечено при внесении двойной дозы навоза + NPK.

Содержание подвижного фосфора в почве повышалось под влиянием систем, имеющих в своем составе фосфорное удобрение, а также возрастало по мере прохождения ротаций севооборота.

После прохождения 4-х ротаций севооборота почва из состояния очень бедной фосфором перешла в группу среднего и повышенного содержания подвижного фосфора.

Содержание обменного калия в почве изменялось под влиянием удобрений незначительно, оставаясь в 4-й ротации на исходном уровне. Заметное повышение содержания обменного калия выявлено только при применении системы NPK + двойная доза навоза в 3-й и 4-й ротациях.

Кислотность почвы без внесения извести в 1–3-й ротациях не изменялась от исходного уровня, под влиянием извести все формы кислотности снижались. В 3-й ротации по показателям кислотности почва из группы сильнокислых почв перешла в группу слабокислых, а в вариантах 2, 18, 10 – в близкую к нейтральной. В результате действия извести и удобрений почва по показателю содержания поглощенных оснований перешла из группы слабокультуренных в группу хорошокультуренных почв.

Корреляционная зависимость урожайности культур и продуктивности севооборота от комплекса агрохимических показателей почвы характеризовалась средней теснотой связи.

Расчет баланса элементов питания показал, что из бедной питательными веществами почвы значительная часть удобрений не использовалась на формирование урожая, а пошла на окультуривание почвы. Для существенного повышения урожаев культур полевого севооборота на такой почве недостаточно вносить удобрения, исходя из размеров их выноса. По мере роста окультуренности почвы урожайность культур и размеры выноса питательных веществ возрастали, изменялись и размеры баланса питательных элементов.

Наиболее высокая продуктивность севооборота среди вариантов минеральной системы удобрения получена при применении полного минерального удобрения на фоне известкования, при слабо положительном балансе азота, слабо отрицательном балансе калия и положительном балансе фосфора во всех ротациях севооборота.

При применении органо-минеральной системы удобрения с единичной дозой навоза более высокая продуктивность севооборота, чем при минеральной системе, была достигнута при слабо положительном балансе азота и калия (кроме слабо отрицательного баланса азота во 2-й ротации) и всегда положительном балансе фосфора. Наиболее высокая продуктивность севооборота получена при применении органо-минеральной системы удобрения с двойной дозой навоза и положительном балансе азота, фосфора и калия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Никитин С.Н.* Влияние средств химизации и биологизации на баланс основных элементов питания в севообороте // Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 гг. Мат-лы Всерос. координац. совещ. научн. учреждений-участников Географической сети опытов с удобрениями / Под ред. В.Г. Сычева. М.: ВНИИА, 2018. С. 174–198.
2. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ВНИИА, 2003. 240 с.
3. *Чеботарев Н.Т., Булатова Н.В., Юдин А.А.* Закономерности изменения плодородия и продуктивности дерново-подзолистой почвы под влиянием комплексного применения органических и минеральных удобрений в кормовом севообороте // Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 гг. Мат-лы Всерос. координац. совещ. научн. учреждений-участников Географической сети опытов с удобрениями. М.: ВНИИА, 2018. С. 333–347.
4. *Пасько С.В., Парамонов А.В., Федюшкин А.В., Медведева В.И.* Эффективность минеральных и органических удобрений в зависимости от насыщения ими севооборота // Там же. С. 202–211.
5. *Сигаркин С.С., Кузнецова З.А.* Изучение систем удобрения полевого севооборота на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой сильнокислой почве // Влияние длительного применения удобрений на плодородие почвы и продуктивность севооборотов. М.: Колос, 1980. С. 5–42.
6. *Кузнецова З.А., Фетисова Н.Ф.* Влияние различных систем удобрения на урожай культур полевого севооборота и плодородие дерново-подзолистой слабокультуренной почвы // Там же. С. 106–126.
7. *Завалин А.А., Коваленко А.А., Забугина Т.М., Самойлов Л.Н., Сапожников С.Н.* Влияние средств химизации на урожайность и качество зерна озимой пшеницы на дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности // *Агрохимия*. 2021. № 3. С. 28–37.
8. *Сычев В.Г., Шафран С.А.* Влияние агрохимических свойств почв на эффективность удобрений. М.: ВНИИА, 2012. 200 с.

Effect of Long-Term Use of Mineral and Organo-Mineral Fertilizer Systems on Crop Yields and Agrochemical Properties of Sod-Podzolic Heavy Loamy Soil

A. A. Kovalenko^{a,#}, T. M. Zabugina^a, A. A. Zavalin^a, and S. N. Sapozhnikov^a

^a *The All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia*

[#]*E-mail: kovalhud@mail.ru*

In a long-term stationary field experiment on poorly cultivated heavy loamy soil on the land use of the Central Experimental Station of VNIIA (Moscow region, Domodedovo district), the productivity of the seven-field crop rotation (vico-oat mixture – winter wheat – clover of the 1st year of use – winter wheat – potatoes – barley – oats) and crop yields consistently increased from 1-th rotation to the 4th. The effect of lime on crop yields was negligible. On nutrient-poor sod-podzolic soil, phosphorus was the most effective of certain types of fertilizers. On average, during the rotation, the increase from the use of P40–46 was 6.9 in the 1st rotation, 10.4 c/ha in the 2nd, and 9.5 and 12.5 c/ha respectively in the 3rd and 4th with the introduction of P69. The use of complete mineral fertilizer in doses of N43P44K47 on average per year against the background of liming increased the productivity of crop rotation by 10.1 c fodder units/ha (from 16.7 to 26.8) in the 1st rotation and by 14.3 c (from 18.6 to 32.9 c fodder units/ha) – in the 2nd, in the 3rd rotations at the dose of application of N77P69K77 – by 16.5 c (from 23.2 to 39.7 fodder units/ha), in the 4th rotation at the same dose of fertilizers – by 25.9 c (from 25.6 to 51.5 fodder units/ha). By the 4th rotation, the efficiency of certain types of fertilizer was leveled. Simultaneously with the increase in crop yields and crop rotation productivity, the cultivation of the soil increased from rotation to rotation. After passing 4 rotations of crop rotation under the influence of lime and fertilizers, the soil from the state of poorly cultivated passed into the group of medium and elevated. The highest productivity of crop rotation was noted with the use of an organo-mineral fertilizer system when manure was applied 40 t/ha (11.4 t/ha/year) and a positive balance of nutrition elements.

Key words: crop rotation, sod-podzolic poorly cultivated soil, soil cultivation, fertilizer system, agrochemical indicators, balance of nutrition elements.