

ИЗМЕНЕНИЕ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ И ПРОДУКТИВНОСТИ ЗЕРНОТРАВЯНОГО СЕВООБОРОТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ БАЛАНСА ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

© 2023 г. А. Н. Налиухин^{1,2,*}, А. В. Ерегин^{2,3},
Д. В. Демидов⁴, Ю. Е. Гусева¹, А. А. Хрунов¹

¹Российский государственный аграрный университет—МСХА им. К.А. Тимирязева
127434 Москва, ул. Прянишникова, 6, Россия

²Вологодская государственная молочно-хозяйственная академия им. Н.В. Верещагина
160555 Вологда, п. Молочное, ул. Шмидта, 2, Россия

³Государственный центр агрохимической службы “Вологодский”
160555 Вологда, п. Молочное, ул. Студенческая, 11, Россия

⁴Группа ФосАгро, ОП АО “Апатит”
119333 Москва, Ленинский просп., 55/1, стр. 1, Россия

*E-mail: naliuhin@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.09.2022 г.

После доработки 29.09.2022 г.

Принята к публикации 14.10.2022 г.

В стационарном полевом опыте на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве изучено влияние систем удобрения (органической, минеральной, органо-минеральной) и известкования на баланс питательных веществ, изменение агрохимических параметров почвы и продуктивность зернотравяного севооборота. По завершению 1-й ротации 5-польного севооборота выявлена средней силы корреляция (0.51) между балансом калия и изменением его содержания в почве, определяемого в вытяжке 0.2 н. НСl (по Кирсанову). Установлено, что известкование по 1.0 Н_г слабокислой почвы увеличило продуктивность севооборота на 10%, что в свою очередь привело к увеличению выноса азота, фосфора и калия урожаем культур на 10–14%. Положительный баланс фосфора был достигнут только в варианте с органо-минеральной системой удобрения при внесении навоза и минеральных удобрений в полной дозе. Выявлено, что при применении органо-минеральной системы удобрения доля биологического азота, поступавшего при распашке клеверного пласта, составляла 26–28%, еще порядка 20–23% N поступало при запашке соломы. Отмечено, что при расчете баланса азота необходимо учитывать его поступление не только с минеральными удобрениями, но и за счет биологической азотфиксации, при заделке соломы и др. Органо-минеральная система обеспечила наибольшую продуктивность зернотравяного севооборота – 51.6 ц з.е./га на неизвесткованном фоне и 57.3 ц з.е./га при известковании. На слабокислом фоне органическая и минеральная системы удобрения обеспечили получение равной продуктивности севооборота – 42.8 ц з.е./га, при известковании небольшое преимущество было за минеральной системой удобрения.

Ключевые слова: баланс питательных веществ, агрохимические свойства почвы, продуктивность севооборота, минеральный и биологический азот, длительный полевой опыт.

DOI: 10.31857/S0002188123010076, **EDN:** FDSRZR

ВВЕДЕНИЕ

Соблюдение научно обоснованного баланса питательных веществ является основой сохранения и повышения плодородия почв [1, 2]. В Нечерноземной зоне России за последние 30 лет складывался отрицательный баланс всех 3-х элементов питания: азота, фосфора и калия [3–5]. При таком положении дел особенно остро встает вопрос о системах удобрения, которые обеспечат

бездефицитный или положительный баланс. Учеными ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова предложено 3 сценария изменения плодородия почв при различной насыщенности удобрениями в России к 2030 г.: инерционный, базовый, оптимистический [6].

По инерционному сценарию (при сохранении современного уровня применения удобрений) баланс азота и калия прогнозируется отрицатель-

ным (–17 и –19 кг/га соответственно), что приведет к неминусовому снижению урожайности сельскохозяйственных культур и деградации почвенного плодородия. Базовый сценарий предполагает возмещение выноса азота на 100, фосфора – на 194% при отрицательном балансе калия. Это позволит замедлить темпы деградации почвы и даст возможность получать стабильный урожай. И, наконец, оптимистичный сценарий подразумевает возмещение выноса азота на 100, фосфора – на 220 и калия – на 85%, что позволит повысить плодородие почв, добиться увеличения доли почв со средней и повышенной обеспеченностью фосфором, тем самым увеличивая урожайность культур и качество растениеводческой продукции [6].

Таким образом, одной из основных задач в разработке и выборе оптимальной системы удобрения, является поиск такой, которая бы соответствовала (или максимально приближалась) к оптимистическому сценарию баланса питательных веществ.

При расчете баланса питательных веществ в почве необходимо учитывать тип севооборота, агрохимические показатели почвы, поступление и отчуждение элементов питания, уровень кислотности. Например, известкование, способствуя снижению кислотности почвы и увеличению доступности элементов питания, увеличивает урожайность культур севооборота. Однако вместе с этим возрастает и вынос элементов питания [7–9]. Применение систем удобрения неоднозначно влияет на баланс элементов питания в дерново-подзолистой почве.

Например, в условиях Республики Коми, на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в кормовом севообороте использование минеральной системы удобрения обеспечило оптимальный баланс азота, фосфора и калия, имея преимущество перед органо-минеральной и органической системами удобрения [10].

В то же время по данным [11], на дерново-подзолистой супесчаной почве в зернопропашном севообороте оптимальные показатели баланса были выявлены при применении органо-минеральной системы удобрения.

Баланс питательных веществ в почве при выращивании той или иной культуры севооборота, как показал ряд работ, также зависит от изменения агрохимических показателей почвы под действием систем удобрения [12–14]. В немаловажной степени он зависит и от того, сколько питательных веществ в почву возвратится с нетоварной частью выращиваемой продукции (с соломой зерновых, ботвой картофеля, поукосно-

корневыми остатками однолетних и многолетних трав и т.п.).

Было показано, что в длительном полевом опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве возврат с соломой зерновых и зернобобовых культур составил 20–26% азота, 21–34% фосфора и 60–74% калия от общего выноса урожаем [15]. По утверждению работы [16], существует определенная взаимосвязь между величинами содержания элементов питания в почве и их выносом урожаем.

Поскольку вынос – неотъемлемая часть баланса питательных веществ, значит должна существовать связь между балансом и изменением содержания этого элемента питания в пахотном слое почвы.

В связи с этим цель работы – выявить взаимосвязь между величиной баланса питательных веществ и изменением их содержания в пахотном слое дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы в зернотравяном севообороте в условиях стационарного полевого опыта.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой опыт заложен в 2015 г. на участке учебно-опытного поля Вологодской ГМХА им. Н.В. Верещагина. Опыт развернут во времени и пространстве на 3-х полях севооборота, вводимых последовательно, с одинаковым набором культур и системами удобрения.

Почва – дерново-среднеподзолистая, среднеоккультуренная, легкосуглинистая на покровных суглинках. В среднем в полях севооборота агрохимические показатели слоя 0–20 см почвы были следующие: кислотность (pH_{KCl}) 5.1, гидролитическая кислотность – 3.77 ммоль(экв)/100 г (по Каппену), сумма поглощенных оснований – 11.7 ммоль(экв)/100 г (по Каппену–Гильковицу), содержание органического углерода ($C_{орг}$) – 1.68%, подвижных фосфора – 273, калия – 132 мг/кг почвы (по Кирсанову), обменного калия (по Масловой) – 171 мг/кг, степень подвижности фосфора и калия (по Скофилду) – 0.64 и 11.2 мг/л соответственно.

Площадь опытных делянок – 100 м², учетная – 80 м², расположение систематическое. Исходя из хозяйственных условий региона исследования (Вологодская обл.), были выбраны следующие культуры, организованные в полевой севооборот: викоовсяная смесь–озимая пшеница–ячмень с подсевом клевера–клевер луговой–овес. Использовали следующие сорта культур: вика посевная сорта Льговская 22, озимая пшеница сорта

Таблица 1. Распределение удобрений в вариантах опыта, кг д.в./га

Система удобрения	Внесено с органическими удобрениями			Внесено с минеральными удобрениями			Итого за ротацию			В среднем за ротацию (5 лет)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1. Контроль (без удобрений)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2. Навоз 50 т/га	150	120	225	0	0	0	150	120	225	30	24	45
3. NPK	0	0	0	150	120	225	150	120	225	30	24	45
4. 1/2 NPK + навоз 25 т/га	75	60	112	75	60	112	150	120	225	30	24	45
5. NPK + навоз 50 т/га	150	120	225	150	120	225	300	240	500	60	48	90

Примечание. В графе 1 – N, 2 – P₂O₅, 3 – K₂O.

Московская 56, ячмень яровой сорта Сонет, клевер луговой сорта Дымковский, овес сорта Лев.

Системы удобрения, и дозы внесения питательных элементов за севооборот представлены в табл. 1.

Во всех вариантах вносили одинаковое количество питательных элементов, в варианте 5 – двойную дозу. Из минеральных удобрений применяли N_{aa} (34.4%), K_x (60%), NPK (N – 15, P₂O₅ – 15, K₂O – 15%), АЗФК (N – 13, P₂O₅ – 19, K₂O – 19%).

В качестве органического удобрения использовали навоз КРС на соломенной подстилке, влажностью 75–80% с содержанием: N – 0.27, P₂O₅ – 0.24, K₂O – 0.45%. Удобрение вносили 1 раз за ротацию под вспашку в занятом пару (под викоовсяную смесь), в дозе 25 и 50 т/га в зависимости от схемы опыта. Известкование проводили также в занятом пару известняковой мукой с содержанием CaCO₃ 98% в дозе по 1.0 Н_г.

Почву на агрохимический анализ отбирали поделаячно, согласно ГОСТ 28168-89 “Почвы. Отбор проб” (с 2020 г. ГОСТ Р 58595-2019). Растительные образцы со всех делянок варианта опыта смешивали и выделяли средний образец для химического анализа. Анализы почвенных образцов проводили в лаборатории агрохимии факультета агрономии и лесного хозяйства, растительных – в аккредитованной лаборатории ГЦАС “Вологодский”. Учет урожайности культур проводили сплошным методом, поделаячно. Соотношение урожаев зерна и соломы определяли в пробных снопах.

Статистическую обработку данных урожайности и агрохимических показателей почвы проводили методом двухфакторного дисперсионного анализа. Для определения взаимосвязи между балансом и изменением агрохимических парамет-

ров использовали линейный корреляционный анализ. Все статистические параметры рассчитывали на основании методик, указанных в [17], при помощи MS Office Excel.

Более подробно методика опыта изложена в работах [18, 19].

В среднем, за годы исследования (2015–2020 гг.), ГТК Селянинова вегетационного периода (1 мая–30 сентября) равнялся 1.9. Избыточно увлажненными были 2017, 2019 и 2020 гг., ГТК Селянинова составлял 2.3 и 2.1 и 2.5 соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты стационарных опытов с удобрениями показывают, что изменения комплекса агрохимических показателей плодородия почвы под действием систем удобрения могут быть значительными [20–22].

Наше исследование показало, что известкование существенно изменило физико-химические свойства и калийный режим почвы и практически не оказало влияния (на статистически достоверном уровне) на фосфатный режим вследствие высокой обеспеченности фосфором почвы до закладки опыта [23].

Известкование снизило кислотность почвы в среднем в опыте по сравнению с первоначальным содержанием на 0.75 ед. рН_{KCl} или на 0.15 ед. в среднем за год (5-летняя ротация). Изученные системы удобрения, напротив, увеличили кислотность почвы, в среднем за севооборот на 0.2 ед. рН_{KCl}. Данный факт свидетельствовал о том, что применение минеральных удобрений даже совместно с навозом КРС на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве не способствовало сохранению первоначальной кислотности.

Таблица 2. Изменения агрохимических свойств пахотного слоя почвы при известковании и применении различных систем удобрения (окончание ротации 5-польного зернотравяного севооборота)

Фактор Б – система удобрения	Фактор А (известкование)											
	pH _{KCl}		P ₂ O ₅ HCl		P ₂ O ₅ CaCl ₂		K ₂ O _{HCl}		K ₂ O _{CH₃COONH₄}		K ₂ O _{CaCl₂}	
	ед.		мг/кг		мг/л		мг/кг		мг/кг		мг/л	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1. Контроль без удобрений	5.1	5.9	249	272	0.25	0.23	103	86	116	107	10.5	11.4
2. Навоз 50 т/га	5.0	5.8	244	259	0.25	0.23	117	89	126	102	8.8	12.1
3. NPK	4.9	5.8	250	272	0.25	0.24	112	93	126	111	11.5	14.1
4. Навоз 25 т/га + 1/2 NPK	5.0	5.9	260	273	0.27	0.27	106	105	114	130	8.8	15.4
5. Навоз 50 т/га + NPK	5.0	5.9	282	288	0.39	0.33	117	106	139	121	10.8	15.7
HCP ₀₅ фактор А	0.1		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		10		13		2.9	
HCP ₀₅ факторы Б × АБ	0.1		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$	
HCP ₀₅ частных различий	0.2		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$		$F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$	

Примечание. В графе 1 – без известкования, 2 – с известкованием.

Известкование, равно как и системы удобрения, не смогло существенно изменить количество подвижного фосфора в пахотном слое по сравнению с первоначальным – оно осталось на очень высоком уровне – 265 мг/кг (в среднем в опыте). Также статистически несущественно изменилась и степень подвижности фосфора (по Скофилду), несмотря на то что по сравнению с первоначальным показателем изменение в среднем в опыте составило 0.37 мг/л в сторону уменьшения.

Изменение содержания обменного калия (по Масловой), так же, как и подвижного (по Кирсанову) подчинялось следующей закономерности: на известкованном фоне уменьшение по сравнению с первоначальным уровнем было более заметным, чем на не известкованном. В то же время изменение степени подвижности K₂O (по Скофилду), напротив, увеличилось под действием известкования по сравнению с не известкованным фоном, в среднем в опыте на 3.7 мг/л, а по сравнению с первоначальным уровнем – на 2.5 мг/л. Данный факт скорее всего объясняется тем, что под действием антагонизма ионов Ca²⁺ и K⁺ последний переходит в менее стабильное состояние в ППК и вытесняется в почвенный раствор, где становится более доступным растениям, тем самым улучшая их калийное питание.

Изменение указанных в табл. 2 агрохимических показателей под действием систем удобрения было статистически недостоверным. Однако проявлялась тенденция к увеличению всех изученных показателей почвы при использовании

органо-минеральной системы удобрения в варианте 5 (навоз 50 т/га + NPK).

Влияние систем удобрения и известкования на урожайность культур севооборота представлено в табл. 3. Применение извести увеличило урожайность всех культур севооборота, прибавка от известкования составляла от 5 до 21%. Максимальную прибавку от известкования отмечали на 3-й год после внесения CaCO₃ для ячменя (21%), минимальную (8%) – на 5-й год для овса. В среднем за севооборот прибавка от снижения кислотности исходно слабокислой почвы составила 10%, при этом эффективность систем удобрения возросла на 15%. Во все годы исследования прибавка урожайности от известкования была статистически достоверной.

Применение систем удобрения на всех культурах севооборота обеспечило статистически достоверную прибавку урожайности. Максимальный ее уровень обеспечило применение органо-минеральной системы удобрения, при сочетании навоза и NPK в полных дозах. Величина прибавки урожайности в данном варианте опыта по отношению к контролю изменялась на фоне известкования от 29 до 90%, а на не известкованном фоне – от 28 до 178%. Наибольшая прибавка урожайности при применении всех изученных систем, за исключением органической, была получена для ячменя.

Стоит отметить, что на слабокислом фоне органо-минеральная система удобрения обеспечили получение равной продуктивности севооборота – 42.8 ц з.е./га. В то же время при из-

Таблица 3. Урожайность товарной части культур зернотравяного севооборота (среднее 2-х полей), ц/га

Фактор <i>Б</i> – система удобрения	Фактор <i>А</i> (известкование)							
	Викоовсяная смесь (зеленая масса)	Озимая пшеница (зерно)	Ячмень с подсевом клевера (зерно)	Клевер луговой (зеленая масса), в сумме за 2 укоса	Овес (зерно)	Среднее за севооборот (з.е.)	Прибавка к контролю (з.е.)	
							ц/га	%
Без известкования – A_1 (pH _{KCl} 5.1–5.2)								
1. Контроль без удобрений	223	25.5	10.4	434	32.3	34.2	–	–
2. Навоз 50 т/га	284	34.0	12.2	488	35.6	42.8	8.6	25
3. NPK	290	37.4	17.0	483	36.2	42.8	8.6	25
4. Навоз 25 т/га + 1/2 NPK	313	44.0	16.0	499	41.9	45.4	11.2	33
5. Навоз 50 т/га + NPK	381	48.5	21.8	555	42.9	51.6	17.4	51
Среднее фактора A_1	298	38.5	15.5	492	37.8	43.4	–	–
С известкованием – A_2 (pH _{KCl} 5.8–5.9)								
1. Контроль без удобрений	238	29.4	13.4	453	34.3	37.0	–	–
2. Навоз 50 т/га	303	40.8	15.7	530	39.1	45.1	8.1	22
3. NPK	318	46.7	20.0	536	39.2	47.8	10.8	29
4. Навоз 25 т/га + 1/2 NPK	342	49.6	18.9	571	41.5	50.5	13.5	36
5. Навоз 50 т/га + NPK	419	55.6	25.4	621	44.3	57.3	20.3	55
Среднее фактора A_2	324	44.4	18.7	542	39.7	47.5	–	–
HCP_{05} фактора A	13	1.6	0.8	21	1.0		2.1	
HCP_{05} факторов $B \times AB$	21	2.5	1.3	33	1.6		3.3	
HCP_{05} частных различий	30	3.5	1.9	47	2.3		4.5	

вестковании преимущество имела минеральная система удобрения. Эти данные подтвердили известное положение о том, что известкование уменьшает физиологическую кислотность минеральных удобрений и повышает их эффективность.

Что же касается эффективности органо-минеральной системы, в которой навоз и NPK вносили в половинных дозах, то прибавка к контролю от ее применения в среднем за севооборот составила 33–36%, и по уровню продуктивности она заняла промежуточное положение между органо-минеральной, где навоз и минеральные удобрения вносили в полных дозах и минеральной системой удобрения.

Учитывая тот факт, что изменение агрохимических показателей под действием систем удобрения за 1-ю ротацию севооборота было статисти-

стически недостоверным, за исключением кислотности (табл. 2), стоит отметить, что вероятно одной 5-летней ротации зернотравяного севооборота недостаточно для прогнозирования изменения урожайности под действием агрохимических параметров плодородия. Впрочем, общеизвестно, что такие данные могут быть получены только в длительных стационарных полевых опытах. Однако в регионе, где был заложен представленный полевой опыт, подобные эксперименты в данном виде севооборота и на конкретной почве не проводили.

Баланс питательных веществ за ротацию зернотравяного севооборота представлен в табл. 4. Благодаря более высокой урожайности вынос питательных веществ на известкованном фоне был больше, чем на не известкованном. Например, вынос азота, фосфора и калия в среднем в вари-

Таблица 4. Баланс питательных веществ в зернотравяном севообороте

Фактор <i>В</i> – система удобрения	Фактор <i>А</i> – известкование	Вынос*, кг/га	Возмещение выноса, %			Общее поступление, кг/га	Баланс, кг/га
			с удобрениями	с соломой	за счет азотфиксации		
Азот							
1. Контроль (без удобрения)	1	457	0	26	27	239	–218
	2	503	0	23	24	240	–263
2. Навоз 50 т/га	1	558	27	25	25	429	–129
	2	630	24	23	24	446	–183
3. NPK	1	599	25	26	23	444	–156
	2	696	22	23	23	472	–224
4. Навоз 25 т/га + 1/2 NPK	1	630	24	24	23	447	–184
	2	688	22	21	24	461	–227
5. Навоз 50 т га + NPK	1	754	40	23	28	688	–65.8
	2	835	36	20	26	688	–147
Фосфор							
1. Контроль (без удобрения)	1	138	0	38	0	52.4	–85.5
	2	155	0	32	0	49.4	–106
2. Навоз 50 т/га	1	168	71	38	0	185	+16.7
	2	198	61	32	0	184	–13.7
3. NPK	1	182	66	34	0	182	–0.7
	2	202	59	32	0	185	–17.4
4. Навоз 25 т/га + 1/2 NPK	1	187	64	37	0	189	+2.6
	2	212	57	33	0	190	–22.0
5. Навоз 50 т га + NPK	1	227	105	32	0	314	+86.3
	2	259	93	30	0	317	+58.6
Калий							
1. Контроль (без удобрения)	1	389	0	51	0	197	–192
	2	413	0	47	0	194	–218
2. Навоз 50 т/га	1	431	52	53	0	454	+23.5
	2	507	44	50	0	476	–30.4
3. NPK	1	470	48	51	0	468	–1.3
	2	520	43	52	0	496	–24.2
4. Навоз 25 т/га + 1/2 NPK	1	483	47	55	0	491	+7.6
	2	547	41	47	0	480	–67.0
5. Навоз 50 т га + NPK	1	623	72	54	0	789	+166
	2	655	69	49	0	770	+115

Примечание. В строке 1 – без известкования, 2 – с известкованием.

*Вынос зерном, зеленой массой викоовсяной смеси и клевера.

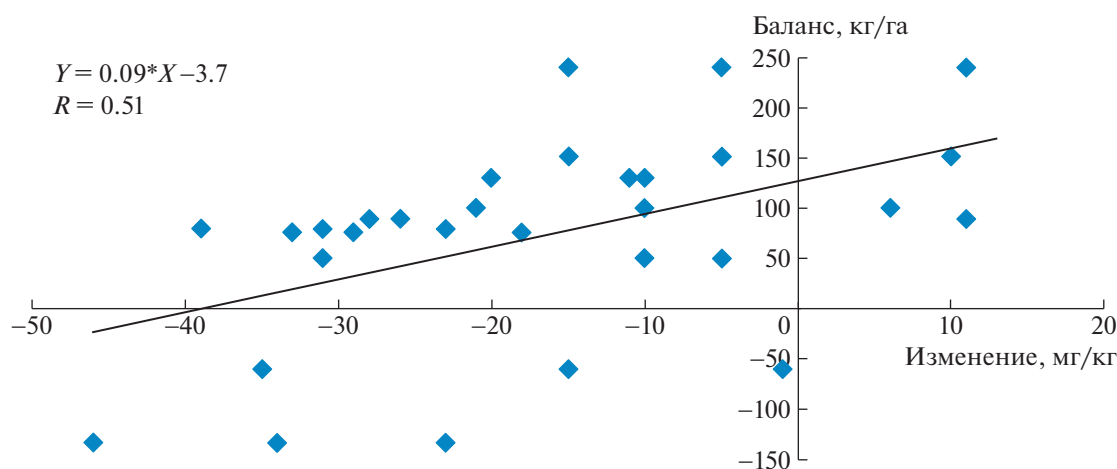


Рис. 1. Корреляция между содержанием в почве подвижного калия (по Кирсанову) и его балансом: Y — изменение содержания подвижного калия, X — баланс K_2O , $n = 30$.

антах опыта на известкованном фоне был больше на 12, 14 и 10% соответственно, чем на не известкованном.

В относительном выражении известкование не способствовало более высокому возврату питательных веществ с побочной продукцией и азотфиксацией. Поступление элементов питания с соломой и за счет азотфиксации на фоне известкования по отношению к их выносу составило: азота — 46, фосфора — 32, калия — 49%, на не известкованном фоне — 50, 36 и 53% соответственно. Однако следует отметить следующее: в структуре возврата азота с удобрениями, биологической азотфиксацией и соломой доля удобрения на фоне известкования в среднем в опыте составила 21%, доля азотфиксации — 24% от общего выноса, тогда как на фоне без применения известки данные показатели были соответственно равны 29 и 25%. Таким образом, положительное действие известки на накопление биологического азота подтвердилось и при известковании слабокислой почвы.

Применение всех изученных систем удобрения не обеспечило положительный баланс азота в севообороте как на фоне внесения известки, так и в вариантах без ее применения. Положительный баланс фосфора был достигнут только в варианте с органо-минеральной системой удобрения при внесении навоза и минеральных удобрений в полной дозе. Причем следует отметить, что без учета возврата калия и фосфора с соломой зерновых баланс в данном варианте сложился бы отрицательный. Также показано, что при применении полной органо-минеральной системы удобрения 50% поступления азота приходилось не на минеральные удобрения, а на азот, поступающий при

распахке клеверного пласта — 26–28% и с соломой — 20–23%.

Таким образом, баланс, близкий к бездефицитному, отмечен при действии сочетания минерального и биологического азота, который не во всех исследованиях берется в расчет, что искажает истинные результаты.

Также за счет возмещения питательных веществ с соломой был достигнут слабopоложительный баланс фосфора и калия на не известкованном фоне в вариантах с применением органической системы и органо-минеральной системы, представленной в варианте 4.

Нами была сделана попытка связать изменение содержания питательных элементов в почве с балансом питательных веществ с целью прогнозирования их изменения при том или ином балансе. На рис. 1 представлена зависимость между изменением содержания подвижного калия (по Кирсанову) в почве и балансом K_2O .

Коэффициент прямолинейной корреляции между показателями был равен 0.51, что позволило говорить о том, что существует умеренной силы связь между балансом калия и изменением его содержания в почве. При такой связи можно с достаточно условной степенью допущения делать прогноз изменения количества подвижного калия в пахотном слое дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. Например, для повышения содержания элемента в почве на 10 мг/кг, баланс элемента должен составлять 152 кг/га, а уменьшение содержания на аналогичную величину появляется при балансе —70 кг/га.

Именно в связи с этим считаем, что исследования по обнаружению более тесной связи между

Таблица 5. Взаимосвязь изменения содержания фосфора и калия в почве, определенных разными методами (Y), с их балансом (X)

Элемент питания	Уравнение регрессии*	Коэффициент корреляции
Подвижный фосфор (по Кирсанову)	$Y = 0.08X - 9.0$	0.14
Степень подвижности фосфора (по Скофилду)	$Y = 0.0007X - 0.38$	0.36
Подвижный калий (по Кирсанову)	$Y = 0.09X - 3.7$	0.51
Степень подвижности калия (по Скофилду)	$Y = -0.003X + 0.95$	-0.08
Обменный калий (по Масловой)	$Y = 0.06X - 56.6$	0.35

Примечание. Число наблюдений – 30.

показателями плодородия почвы (в частности содержанием фосфора и калия) и балансом элементов питания требуют продолжения.

В табл. 5 приведены результаты регрессионного анализа взаимосвязи между изменением содержания элемента питания (Y), определенного различными методами и его балансом (X). Стоит отметить, что данные коэффициенты корреляции не могут считаться окончательными, ввиду достаточно малого времени действия стационарного опыта.

Как было отмечено выше, уравнения регрессии и коэффициенты корреляции изменяются при более длительном проведении полевого опыта. Также стоит отметить, что в большинстве представленных случаев уровень взаимосвязи менялся от незначительного (0.14) до среднего (0.51).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, известкование слабокислой дерново-подзолистой почвы с высоким содержанием подвижного фосфора и средним – калия (по Кирсанову) способствовало сдвигу реакции почвенной среды пахотного слоя на 0.75 ед. pH_{KCl} за 5-летнюю ротацию зернотравяного севооборота. Это привело к изменениям в калийном режиме почвы, стабилизировало содержание подвижного фосфора (по Кирсанову) и степени его подвижности (по Скофилду) в пахотном слое почвы. Эти изменения положительно отразились на урожайности культур севооборота, увеличив продуктивность севооборота на 10% по сравнению с не известкованным фоном.

Несмотря на то что влияние изученных систем удобрения на агрохимические показатели плодородия дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы не было статистически существенным, их применение увеличило продуктивность зернотравяного севооборота в среднем на 35% по срав-

нению с неудобренным вариантом (контролем). Максимальную прибавку урожайности севооборота к контролю без удобрения (на 51–55%) отметили в варианте с органо-минеральной системой удобрения. Наименьшая прибавка отмечена при использовании органической системы (22–25%).

Вынос элементов питания с товарной частью урожая был больше на известкованном фоне и в вариантах с применением удобрений. Положительного баланса азота в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при использовании изученных систем удобрения в совокупности с учетом поступления биологического азота за счет азотфиксации и с соломой зерновых культур достичь не удалось. В то же время применение органо-минеральной системы удобрения позволило обеспечить возмещение выноса азота (с учетом всех источников) на 82–91% и получить наибольшую среднегодовую продуктивность севооборота – 51.6–57.3 ц з.е./га.

Величины содержания подвижного калия в почве (по Кирсанову) и его баланса были связаны средней силы положительной корреляцией – 0.51. Взаимосвязи балансов фосфора и калия с прочими их фракциями в почве показали, что прямолинейная корреляция между этими показателями отсутствовала или проявлялась как слабая (от -0.08 до 0.36).

Таким образом, прогнозирование изменения содержания элементов питания в почве на основе баланса питательных веществ для корректировки почвенного плодородия представляет проблему, требующую скорейшего решения с привлечением всей полученной информации в длительных полевых опытах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев В.Г., Шафран С.А. О балансе питательных веществ в земледелии России // Плодородие. 2017. № 1. С. 1–4. EDN: YHGQID

2. *Edmeades D.C.* The long-term effects of manures and fertilizers on soil productivity and quality: a review // *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2003. V. 66. P. 165–180. EDN: EQNQDF
<https://doi.org/10.1023/A:1023999816690>
3. *Шафран С.А.* Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны // *Агрохимия.* 2016. № 8. С. 3–10. EDN: WHGKOZ
4. *Кудеяров В.Н.* Баланс азота, фосфора и калия в земледелии России // *Агрохимия.* 2018. № 10. С. 3–11. EDN: VKRYWH
<https://doi.org/10.1134/S0002188118100101>
5. *Шафран С.А., Ермаков А.А., Виноградова С.Б., Семенова А.И.* Изменение плодородия почв Нечерноземной зоны за 50-летний период // *Агрохим. вестн.* 2021. № 5. С. 3–7. EDN: TNWLAA
<https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-5-001>
6. *Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б.* Плодородие почв России и пути его регулирования // *Агрохимия.* 2020. № 6. С. 3–13. EDN: POXVQI
<https://doi.org/10.31857/S0002188120060125>
7. *Дзюин А.Г., Дзюин Г.П.* Влияние длительного применения систем удобрений на баланс питательных веществ в почве // *Агрохим. вестн.* 2015. № 6. С. 14–17. EDN: UYCRVP
8. *Кузьменко Н.Н.* Баланс элементов питания дерново-подзолистой почвы в льняном севообороте // *Агрохимия.* 2021. № 6. С. 3–7.
<https://doi.org/10.31857/S0002188121060089>
9. *Кирпичников Н.А., Бижан С.П.* Влияние извести на физико-химические свойства дерново-подзолистой почвы и продуктивность полевого севооборота при систематическом применении азотных и калийных удобрений в длительном опыте // *Агрохимия.* 2019. № 8. С. 14–17. EDN: EDQMKY
<https://doi.org/10.1134/S0002188119080064>
10. *Чеботарев Н.Т., Юдин А.А.* Влияние органических и минеральных удобрений на свойства и продуктивность дерново-подзолистой почвы в условиях республики Коми // *Аграрн. наука Евро-Северо-Востока.* 2015. № 6. С. 43–46. EDN: UPUMKR
<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2015.49.6.43-46>
11. *Золкина Е.И.* Влияние длительного применения систем удобрения на баланс элементов питания в зернопропашном севообороте // *Агрохим. вестн.* 2017. № 6. С. 67–70. EDN: YKHACW
12. *Мимонов Р.В., Белоус Н.М., Смольский Е.В., Антонова М.В., Пургина А.В.* Баланс элементов питания при возделывании озимой пшеницы на дерново-подзолистой супесчаной почве в зависимости от систем удобрения // *Вестн. Брянск. ГСХА.* 2021. № 1. С. 3–10. EDN: VZEQU
13. *Иовик Л.Н., Дашкевич М.М.* Вынос ячменем элементов питания и их баланс при применении известковых мелиорантов на среднекислой дерново-подзолистой супесчаной почве // *Мелиорация.* 2022. № 1. С. 48–53. EDN: JNXVQU
14. *Чухина О.В., Обряева О.Д., Кулакова И.Е., Смирнов Д.Е.* Урожайность зерна озимой ржи, вынос культурой элементов питания при применении удобрений в Вологодской области // *Молочно-хоз. вестн.* 2019. № 2. С. 62–71. EDN: HPICJD
15. *Русакова И.В.* Баланс элементов питания и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы при использовании соломы на удобрение // *Международ. научн.-исслед. журн.* 2015. № 8. С. 53–55. EDN: ULEKDV
16. *Шафран С.А., Кирпичников Н.А.* Научные основы прогнозирования содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах // *Агрохимия.* 2019. № 4. С. 3–10. EDN: ZBGQMP
<https://doi.org/10.1134/S0002188119040112>
17. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Агропроиздат, 1985. 351 с. EDN: ZJQBUD
18. *Налиухин А.Н., Белозеров Д.А., Ерегин А.В.* Изменение агрохимических показателей дерново-средне-подзолистой легкосуглинистой почвы и продуктивности культур севооборота при применении различных систем удобрения // *Земледелие.* 2018. № 8. С. 3–7. EDN: YTZGRF
<https://doi.org/10.24411/0044-3913-2018-1080>
19. *Налиухин А.Н., Белозеров Д.А.* Влияние различных систем удобрения и известкования на урожайность, технологические и хлебопекарные качества зерна озимой пшеницы в условиях Северного Нечерноземья // *Агрохимия.* 2020. № 1. С. 33–42. EDN: HMZPDZ
<https://doi.org/10.31857/S000218812001010X>
20. *Шафран С.А., Ермаков А.А., Семенов А.И., Яковлева Т.А.* Динамика содержания питательных веществ в дерново-подзолистых почвах в длительных полевых опытах // *Плодородие.* 2020. № 4. С. 7–9. EDN: GIVBYO
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.115.02>
21. *Косолапова А.И., Завьялова Н.Е., Митрофанова Е.М., Васбиева М.Т., Ямалтдинова В.Р., Фомин Д.С., Тертерлев И.С.* Эффективность длительного применения удобрений на дерново-подзолистых почвах Предуралья // *Агрохимия.* 2018. № 2. С. 42–55. EDN: YTEATS
<https://doi.org/10.7868/S0002188118020047>
22. *Лапа В.В., Ивахненко Н.Н., Кулеш О.Г.* Продуктивность зернотравяных севооборотов и баланс элементов питания при возделывании сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистых супесчаной и суглинистой почвах // *Почвовед. и агрохим.* 2015. № 1. С. 115–134. EDN: YMBNSP
23. *Налиухин А.Н.* Изменение агрохимических свойств и микробиоценоза дерново-подзолистой почвы при применении удобрений и известковании // *Плодородие.* 2021. № 5(122). С. 44–48. DOI: EDN: YPPZGW
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.122.11>

Changes in Agrochemical Properties of Sod-Podzolic Soil and Productivity of Grain-Grass Crop Rotation Depending on Nutrients Balance

A. N. Naliukhin^{a, b, #}, A. V. Eregina^{b, c}, D. V. Demidov^d,
Yu. E. Guseva^a, and A. A. Khrunov^a

^a*Russian State Agrarian University—K.A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy
ul. Pryanishnikova 6, Moscow 127434, Russia*

^b*N.V. Vereshchagin Vologda State Dairy Farming Academy
ul. Shmidta 2, s. Molochnoe, Vologda 160555, Russia*

^c*State Center of Agrochemical Service "Vologda"
ul. Studencheskaya 11, s. Molochnoe, Vologda 160555, Russia*

^d*PhosAgro Group, Apatit JSC
Leninsky prosp. 55/1, build. 1, Moscow 119333, Russia*

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

In a stationary field experiment on soddy-podzolic light loamy soil, the influence of fertilizer systems (organic, mineral, organo-mineral) and liming on the balance of nutrients, changes in the agrochemical parameters of the soil and the productivity of grain-grass crop rotation was studied. At the end of the 1st rotation of the five-field crop rotation, a medium-strength correlation (0.51) was revealed between the potassium balance and the change in its content in the soil, determined in an extract of 0.2 n. HCl (according to Kirsanov method). It was established that liming at 1.0 H_a of slightly acidic soil increased the productivity of crop rotation by 10%, which in turn led to an increase in the removal of nitrogen, phosphorus and potassium with crop yields by 10–14%. A positive balance of phosphorus was achieved only in the variant with an organo-mineral fertilizer system when applying manure and mineral fertilizers in full dose. It should be emphasized the need to take into account the return of nutrients with straw, in case of plowing in the field. It was revealed that in the organo-mineral fertilizer system, the share of biological nitrogen entering during the plowing of the clover layer is 26–28%, and about 20–23% more N is supplied during the plowing of straw. It was noted that when calculating the nitrogen balance, it is necessary to take into account its supply not only with mineral fertilizers, but also due to biological nitrogen fixation, when incorporating straw, etc. Failure to take into account these sources can lead to serious miscalculations. The organo-mineral system provided the highest productivity of the grain-grass crop rotation – 5.16 t of grain units/ha on an unlimed background and 5.73 t of grain units/ha with liming. On a slightly acidic background, the organic and mineral fertilizer systems ensured an equal crop rotation productivity of 4.28 t of grain units/ha, while liming had a slight advantage for the mineral system.

Key words: nutrient balance, soil agrochemical properties, crop rotation productivity, mineral nitrogen and biological nitrogen, long-term field experiment.