

УДК 631.811.2:631.559:631.82:631.873

ПРИМЕНЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ И РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ФОСФАТНОГО ПИТАНИЯ И ПРОДУКТИВНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

© 2022 г. В. М. Назарюк¹, Ф. Р. Калимуллина^{1,*}

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 8/2, Россия

*E-mail: kalimullina@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 25.04.2022 г.

После доработки 04.07.2022 г.

Принята к публикации 12.08.2022 г.

В микрополево-севообороте на серой лесной почве изучена динамика доступных для растений основных форм фосфора при внесении минеральных удобрений и растительных остатков. Наибольшие изменения в формах почвенных фосфатов происходили при использовании минеральных удобрений в дозах N60P40K60 и N90P60K90. Внесение растительных остатков вызывало как повышение, так и снижение содержания легкоподвижных форм элемента. Максимальные изменения этих форм фосфатов в почве отмечали при использовании метода Карпинского и Замятиной. Продуктивность растений возрастала в случае применения минеральных удобрений, заделка в почву растительных остатков вызывало как повышение, так и снижение продуктивности растений.

Ключевые слова: почва, удобрение, формы фосфора, почвенная диагностика, растение, севооборот, урожайность.

DOI: 10.31857/S0002188122110096

ВВЕДЕНИЕ

Создание научно-обоснованной системы обработки почв в условиях систематической засухи является одной из наиболее важных проблем при возделывании зерновых культур по интенсивной технологии, тесно связанной с оптимизацией фосфорного питания [1]. Особенно остро такая ситуация возникает при ветровой эрозии почв. Это затрагивает ряд проблем в использовании фосфора, касающихся выяснения специфики применения соломы в зерновом севообороте [2, 3], решения аспектов утилизации пожнивно-корневых остатков [4] и управления генотипической спецификой растений [5]. Добиться существенных результатов можно также за счет регулирования минерального питания [6, 7] и рационального использования почвенных ресурсов [8, 9], изученность которых в настоящее время сильно отличается как в зональном, так и территориальном аспектах [10, 11]. К тому же, большое влияние на фосфатный режим почв оказывают различные экологические факторы, которые особенно сильно влияют в последние годы [12, 13]. Отмечено [14], что при экстенсивном земледелии в лесостепной зоне на серых лесных и черноземных

почвах основным источником фосфора служат горные породы (эффузивные, интрузивные и метаморфические), в то время как при интенсивном — расширяются возможности использования элемента из органических и минеральных удобрений, а также местных фосфоритов. В длительном опыте (46 лет) на каштановых почвах степной зоны установлено [12], что в зернопаровом севообороте применение органической системы удобрения увеличило содержание валового фосфора на 10%, одновременно уменьшились потери этого элемента в минеральной форме до 4%. В целом наиболее изученными оказались черноземные почвы [13, 14], отличающиеся высоким плодородием и экологической устойчивостью. Для таких почв пожнивно-корневые остатки играют важную роль в обеспечении растений природным фосфором и другими макроэлементами [15]. Менее исследованы другие типы почв, хотя в земельном фонде они занимают важное место. Крайне недостаточно работ проведено при выяснении состояния фосфатного фонда в длительных опытах, позволяющих прогнозировать влияние минеральных удобрений и растительных остатков (РО) в почве, выяснить доступность фосфатов в

различных формах и увязать почвенные процессы с продуктивностью растений. В связи с малой изученностью данной проблемы и ее несомненной актуальностью в прикладном аспекте, современное земледелие настоятельно требует проведения дальнейших исследований. Цель работы – изучить состояние форм фосфора в серой лесной почве и обосновать эффективность применения минеральных удобрений на фоне запахивания растительных остатков в системе полевого севооборота.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение эффективности внесения минеральных удобрений и заделки в почву соломы проводили в модельном полево-м севообороте с чередованием культур: овес (сорт Ровесник)–ячмень (сорт Ача)–пшеница яровая (сорт Новосибирская 22). Почва опытного участка – серая лесная среднесуглинистого гранулометрического состава, слабо обогащена гумусом (3.94%) и валовым азотом (0.13%), имела низкое содержание обменного калия (12 мг/100 г), рН 7.2. Почвенные образцы отбирали весной и осенью, растительные – в фазе кущения и при уборке урожая. Содержание гумуса в почве определяли по методу Тюрина, общий азот – колориметрическим методом с реактивом Несслера, обменный калий – по Масловой, рН_{H₂O} – потенциометрическим методом.

Потребность растений в макроэлементах рассчитывали, исходя из эффективных доз минеральных удобрений, установленных ранее в полевых опытах [16, 17]. В качестве органического удобрения использовали пожнивные и корневые остатки + надземную вегетативную массу зерновых культур (солому), которые измельчали после уборки урожая и затем осенью заделывали в почву.

Микрополевые опыты с зерновыми культурами проводили в четырехкратной повторности на делянках общей площадью 2 м², обернутых полиэтиленовой пленкой, и учетной – 0.5 м². Минеральные удобрения вносили в виде N_м, P_{ст} и K_х. В условиях лесостепной зоны Западной Сибири сумма положительных температур за период май–август обычно изменяется в пределах 1497–1993°C, количество осадков – 112–364 мм. За время метеорологических наблюдений с 2004–2013 гг. сумма положительных температур (t > 0°C) за период май–август составляла в среднем 1645°C, количество осадков – 212 мм.

Аналитическую работу выполняли в трехкратной повторности. Обеспеченность растений почвенным фосфором определяли на основе следую-

щих методов: легкоподвижный фосфор – по Карпинскому–Замятиной (КиЗ) и Францессону (Фр), подвижный – по Чирикову (Чр), малоподвижный (Мп) – по [18], органический фосфор – по разности между его валовым и минеральным содержанием – по Хейфиц, валовой фосфор – по Гинзбург. Запасы почвенного фосфора рассчитывали, исходя из содержания элемента (данные получены нами) и плотности сложения для серой лесной почвы [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что содержание валового фосфора было довольно высоким во всех вариантах опыта (табл. 1), что является характерной чертой для почв Приобского плато, сформированных под влиянием сноса и переотложения делювия склонов фосфоритоносных бассейнов [20]. Такие почвы обычно содержат повышенное содержание общего фосфора, который изобилует окклюдируемыми формами этого элемента [21]. В исходных образцах содержание валового фосфора изменялось мало, небольшие изменения наблюдали лишь в варианте с максимальной дозой фосфора. После 18-летнего выращивания зерновых культур отмечено снижение содержания валового фосфора, когда применяли низкие дозы фосфора или не применяли их вообще. И только в вариантах N60P40K60 и N90P60K90, в которых вносили удобрения в повышенной дозе, содержание фосфора практически не изменялось. Запасы валового фосфора в пахотном слое существенно повышались в начальный период освоения севооборота, но особенно четко эти различия проявлялись при отборе почвенных образцов в конце опыта.

Содержание органического фосфора было довольно высоким в начале освоения зернового севооборота и мало изменялось в вариантах опыта. В конце проведения эксперимента содержание органических фосфатов за весь период существенно снизилось, что было связано, вероятно, с усилением процессов минерализации органических веществ при систематической обработке почвы. Низкое содержание этой формы фосфора заметно реагировало на внесение минеральных удобрений и заделку в почву растительных остатков. В начальный период в запасах органического фосфора не отмечали значительного отклонения в контрольном и удобренных вариантах, вплоть до внесения дозы P40. И только при дальнейшем усилении фосфорного питания (P60) в сочетании с азотом, калием и растительными остатками отмечено заметное увеличение запасов органиче-

Таблица 1. Содержание (%) и запасы форм почвенного фосфора (т/га) при многолетнем внесении минеральных удобрений и растительных остатков

Вариант	Фосфор					
	минеральный		органический		валовый	
	1	2	1	2	1	2
1998 г.						
Контроль	0.10	2.2	0.09	2.0	0.19	4.2
N30P20K30	0.10	2.2	0.09	2.0	0.19	4.2
N60P40K60	0.11	2.4	0.09	2.0	0.20	4.4
N90P60K90	0.11	2.4	0.10	2.2	0.21	4.6
2018 г.						
Контроль	0.07	1.5	0.01	0.2	0.08	1.7
Растительные остатки (PO)	0.09	2.0	0.03	0.7	0.12	2.7
N30P20K30	0.10	2.2	0.03	0.7	0.13	2.9
N30P20K30 + PO	0.09	2.0	0.04	0.9	0.13	2.9
N60P40K60	0.11	2.4	0.02	0.4	0.13	2.8
N60P40K60 + PO	0.11	2.4	0.03	0.7	0.14	3.1
N90P60K90	0.13	2.9	0.03	0.7	0.16	3.6
N90P60K90 + PO	0.13	2.9	0.04	0.9	0.17	3.8
HCP ₀₅	0.02	0.23	0.01	0.1	0.02	0.2

Примечание. В графе 1 – %, 2 – запасы, т/га.

ских фосфатов. После многолетнего внесения минеральных удобрений и систематической заделки в почву соломы выявили существенное увеличение запасов органического фосфора относительно контрольного варианта. Однако изменения этой формы не достигли первоначального уровня.

В исходном содержании минеральных фосфатов не отмечено достоверной разницы между контрольным и удобренными вариантами. Аналогичная закономерность выявлена и в вариантах, где вносили удобрения в минимальном количестве. И только при дозе P60 отметили существенное увеличение содержания минеральных фосфатов. Снижение этой формы фосфора связываем прежде всего с потреблением его легкодоступных соединений растениями в период их вегетации. Эта закономерность проявлялась и при окончании опыта, хотя величина содержания подвижных фосфатов не всегда достигала первоначального уровня. Запасы этой формы фосфатов также практически не изменялись в период освоения севооборота, и только после многолетнего применения удобрений наблюдали заметное увеличение запасов минеральных фосфатов.

Изучение фракционного состава фосфора показало, что его содержание во многом зависело от уровня минерального питания, длительности

применения удобрений и запахивания растительных остатков (табл. 2). При выяснении специфики формирования такого фосфатного фонда было отдано предпочтение методу Гинзбург–Лебедевой, который позволяет оценить величину фракций фосфатов кальция, алюминия и железа по степени их доступности растениям [22]. Наиболее легко усваиваются корневой системой растений фосфаты Ca-P_I щелочных металлов и аммония, содержание которых в исходных образцах оказалось минимальным и составило 10 мг/100 г. Во фракции Ca-P_{II} содержание фосфатов в почве контрольного варианта было больше примерно в 1.7 раза, что свидетельствовало о наличии менее доступной для растений рыхлосвязанной формы фосфора. В итоге это отражалось на состоянии фосфатного фонда и способности почвенного покрова обеспечить сбалансированное минеральное питание растений в период их вегетации. Еще более высокое содержание фосфатов алюминия, железа и особенно высокоосновных P-кальция отметили в почве исходного варианта, что могло повлиять на установление равновесного состояния между формами изученного элемента. Внесение минеральных удобрений в период освоения севооборота мало сказывалось на фракционном составе фосфора в почве.

Таблица 2. Изменение фракционного состава минеральных фосфатов при систематическом внесении удобрений и растительных остатков

Вариант	Ca–P _I	Ca–P _{II}	Al–P	Fe–P	Ca–P _{III}	Сумма
1998 г.						
Контроль	<u>10.0</u>	<u>16.8</u>	<u>30.8</u>	<u>75.5</u>	<u>103</u>	<u>236</u>
	22.0	37.0	67.8	166	226.2	519
N30P20K30	<u>10.1</u>	<u>18.0</u>	<u>22.7</u>	<u>83.1</u>	<u>97.1</u>	<u>231</u>
	22.2	39.6	49.9	183	214	508
N60P40K60	<u>9.9</u>	<u>17.3</u>	<u>23.4</u>	<u>88.1</u>	<u>106</u>	<u>245</u>
	21.8	38.1	51.5	194	234	539
N90P60K90	<u>9.7</u>	<u>17.0</u>	<u>24.8</u>	<u>93.7</u>	<u>123</u>	<u>267</u>
	21.3	37.4	54.6	206	270	589
2018 г.						
Контроль	<u>6.2</u>	<u>18.1</u>	<u>22.3</u>	<u>34.1</u>	<u>106</u>	<u>187</u>
	13.6	39.8	49.1	75.0	234	411
Растительные оистатки (PO)	<u>10.1</u>	<u>19.2</u>	<u>25.4</u>	<u>37.5</u>	<u>142</u>	<u>234</u>
	22.2	42.2	55.9	82.5	312	515
N30P20K30	<u>11.6</u>	<u>18.7</u>	<u>18.6</u>	<u>41.2</u>	<u>158</u>	<u>248</u>
	25.5	41.1	40.9	90.6	347	545
N30P20K30 + PO	<u>14.6</u>	<u>20.6</u>	<u>24.3</u>	<u>51.7</u>	<u>164</u>	<u>245</u>
	32.1	45.3	53.5	114	361	605
N60P40K60	<u>16.9</u>	<u>21.0</u>	<u>24.1</u>	<u>55.9</u>	<u>174</u>	<u>292</u>
	37.2	46.2	53.0	123.0	382	642
N60P40K60 + PO	<u>16.6</u>	<u>21.9</u>	<u>26.5</u>	<u>51.5</u>	<u>180</u>	<u>297</u>
	36.5	48.2	58.3	113	397	653
N90P60K90	<u>5.6</u>	<u>28.1</u>	<u>23.9</u>	<u>57.1</u>	<u>205</u>	<u>318</u>
	12.3	61.8	52.6	126	452	704
N90P60K90 + PO	<u>4.9</u>	<u>28.3</u>	<u>23.2</u>	<u>48.9</u>	<u>168</u>	<u>273</u>
	10.8	68.4	51.0	108	369	606
HCP ₀₅	<u>0.5</u>	<u>1.0</u>	<u>1.4</u>	<u>1.7</u>	<u>3</u>	<u>9</u>
	1.6	2.4	2.5	4	5	30

Примечание. Над чертой – содержание фосфатов, мг/100 г, под чертой – запасы, кг/га.

В результате длительного выращивания зерновых культур и заделке в почву растительных остатков произошло заметное накопление фосфатов во фракции Ca–P_I (кроме варианта N90P60K90) и Ca–P_{III}, в остальных фракциях существенных изменений не обнаружено. Увеличение содержания фосфора в 2-х фракциях минеральных фосфатов отразилось и на суммарной величине этих соединений. Внесение удобрений в минимальных дозах практически не отразилось на фракционном составе фосфатов. Незначительные изменения в их содержании отметили при использовании удобрений в дозах, не превышающих P40. Внесение фосфора в дозе P60 вызвало различный отклик: содержание фосфатов щелочных металлов и аммония несколько снизилось, а высокоосновных фосфатов кальция, на-

оборот, повысилось, что и сказалось на суммарной величине содержания всех форм фосфора. В целом совместное применение удобрений и использование растительных остатков вызывало накопление в почве малоподвижных и высокоосновных форм фосфатов, что требовало рационального подхода к внесению фосфорных удобрений при возделывании зерновых культур в системе севооборота.

Различия во внесении минеральных фосфорных удобрений отразились своеобразно и на запасах фосфора во фракциях. В начальный период освоения севооборота (1998 г.) наблюдали изменения содержания высокоосновных фосфатов кальция и общих запасов фосфора в почве только в варианте N90P60K90. После ряда ротаций севооборота, внесения удобрений и запахивания рас-

Таблица 3. Влияние минеральных удобрений и растительных остатков на содержание легкоподвижных форм фосфора в почве, мг/100 г почвы

Вариант	2012 г.	2018 г.	Среднее	2012 г.	2018 г.	Среднее
	метод проведения эксперимента					
	по Карпинскому–Замятиной			по Францессону		
Контроль	0.2	Следы	0.1	1.3	0.5	0.9
Растительные остатки (PO)	0.3	0.1	0.2	1.4	0.7	1.1
N30P20K30	0.5	0.2	0.3	3.8	1.1	2.4
N30P20K30 + PO	0.5	0.2	0.3	3.1	1.2	2.2
N60P40K60	1.5	0.3	0.9	9.1	3.0	5.2
N60P40K60 + PO	1.7	0.4	1.1	9.5	3.1	6.3
N90P60K90	3.4	0.4	1.9	6.8	4.3	10.6
N90P60K90 + PO	2.0	0.4	1.2	11.1	4.0	7.6
HCP ₀₅	0.1	0.01		0.1	0.1	

тительных остатков возросли запасы фосфатов железа и высокоосновных фосфатов кальция. В остальных фракциях изменения были незначительными. Отметим, что ранее существовало мнение о предпочтительном усвоении фосфатов кальция растениями как главного источника фосфатного питания, однако в дальнейшем стали больше уделять внимание алюминиевым и железистым фосфатам [23].

Кроме фракционного состава фосфора при оценке эффективного состояния почвенного плодородия большое значение имеет содержание легкоподвижных фосфатов в почве, от наличия которых зависит усвоение элемента растениями и в конечном итоге продуктивность растений. Исследования показали (табл. 3), что при использовании метода Карпинского и Замятиной экстрагируется незначительная величина легкоподвижных фосфатов – от 0.2 мг/100 г до следовых количеств. Заделка растительных остатков в почву мало влияла на содержание этой формы. Внесение минимальной дозы удобрений в сочетании с соломой также незначительно отразилось на подвижности фосфатов и только усиление минерального питания позволило существенно изменить картину обеспеченности растений легкоподвижными фосфатами. Внесение исключительно минеральных удобрений в повышенных дозах или совместно с соломой приводило как к повышению, так и снижению содержания легкоподвижных фосфатов, а иногда и вообще к отсутствию ожидаемого эффекта.

При использовании метода Францессона экстрагировалось из почвы значительно больше легкоподвижных фосфатов, особенно в более ранний период освоения модельного зернового сево-

оборота. Применение минеральных удобрений в дозе N30P20K30 приводило к значительному увеличению легкоподвижного фосфора в почве. Эта же доза удобрений на фоне соломы вызвала как существенное снижение, так и заметное повышение содержания легкоподвижных почвенных фосфатов. Это было связано с тем, что растительные остатки в сочетании с удобрениями влияют, прежде всего, на процессы минерализации–иммобилизации, интенсивность и направленность которых воздействует на интенсивность высвобождения минерального фосфора из органических веществ. Внесение удобрений в дозе N60P40K60 по сравнению с дозой N30P20K30 + PO вызывало во все годы опыта существенное увеличение содержания легкоподвижных фосфатов. На этом фоне минерального питания внесение соломы сопровождалось как значительным увеличением, так и тенденцией к увеличению содержания почвенных фосфатов. Повышение дозы минеральных удобрений до N90P60K90 по сравнению с дозой N60P40K60 + PO вызывало либо значительное снижение, либо заметное увеличение содержания этой формы фосфора. Внесение растительных остатков на фоне самой высокой дозы минеральных удобрений не вызывало однозначной реакции почвенных процессов: отмечали как повышение, так и снижение содержания легкоподвижного фосфора в почве.

Различные условия минерального питания отразились на содержании подвижных форм фосфора неодинаково (табл. 4). Например, в ранний период содержание фосфатов, установленных по методу Чирикова, было меньше по сравнению с периодом конечной ротации зернового севооборота примерно в 1.7 раза. Такая тенденция сохра-

Таблица 4. Содержание в почве фосфатов различной активности при внесении соломы и минеральных удобрений, мг/100 г почвы

Вариант	2012 г.	2018 г.	Среднее	2012 г.	2018 г.	Среднее
	фракции фосфатов					
	подвижный по Чирикову			малоподвижный [по 20]		
Контроль	6.5	11.4	8.9	100	76	88
Растительные остатки (PO)	6.6	13.4	10.0	98	62	80
N30P20K30	11.3	21.4	16.4	114	90	102
N30P20K30 + PO	8.4	17.5	12.9	103	100	101
N60P40K60	15.7	30.4	23.0	133	110	121
N60P40K60 + PO	17.4	28.4	22.9	120	110	115
N90P60K90	25.2	28.5	26.8	168	110	139
N90P60K90 + PO	17.4	31.6	24.5	150	100	125
HCP ₀₅	0.7	1.4		7	6	

нилась в течение всего 2018 г., хотя минеральные удобрения в сочетании с растительными остатками по-разному воздействовали на содержание почвенных фосфатов изученных форм. Заделка в почву только растительных остатков мало отразилась на этом показателе: в отдельных случаях наблюдали даже достоверное снижение содержания подвижного фосфора. Например, при внесении N30P20K30 величина содержания подвижных фосфатов составила в 2012 г. 11.3 мг и в 2018 г. – 21.4 мг/100 г, в то время как при совместном внесении минеральных удобрений и растительных остатков в эти же годы их количество снизилось на 25 и 18% соответственно. Отмечена и другая закономерность, когда содержание подвижного фосфора либо повышалось, либо его величина оставалась без изменений. Аналогичная закономерность сохранялась и при анализе изменений усредненного содержания подвижных фосфатов в удобренной и неудобренной почвах.

Сформированное количество малоподвижных фосфатов во многом зависело от условий года, минерального питания и внесения растительных остатков. При более раннем отборе почвенных образцов содержание фосфатов в контрольном варианте существенно снизилось по сравнению с почвой, отобранной в конце нескольких ротаций севооборота. Заметное уменьшение содержания малоподвижных фосфатов при чередовании зерновых культур отметили во всех вариантах, где вносили только растительные остатки или в максимально удобренных вариантах (N90P60K90 и N90P60K90 + PO). Иногда заделка в почву растительных остатков практически не оказывала влияния на содержание малоподвижных фосфатов, например, в вариантах N60P40K60 и

N60P40K60 + PO в условиях 2018 г. Внесение минеральных удобрений влияло на содержание малоподвижных фосфатов в почве с некоторыми особенностями. Например, в почвенных образцах 2012 г. их величина во многом зависела от доз минеральных удобрений и в меньшей степени от заделки в почву растительных остатков. Оказалось, что с усилением минерального питания увеличивалось содержание малоподвижных фосфатов, тогда как применение соломы нередко приводило к снижению содержания этих соединений, что подтверждалось в большинстве исследованных вариантов. После завершения изученных ротаций севооборота установилось равновесное содержание малоподвижных фосфатов между их закреплением в минеральной основе и высвобождением P из почвенных запасов. При рассмотрении усредненных величин содержания малоподвижных фосфатов большее их содержание отметили в варианте, где вносили исключительно минеральные удобрения в повышенных дозах без запахивания соломы.

В целом можно утверждать, что существующие формы минеральных фосфатов сильно отличаются по их способности к экстрагированию из почвенных ресурсов. По этому показателю заметно превосходит метод определения малоподвижных фосфатов, при котором извлекают гораздо больше фосфора, чем при применении остальных методов для определения подвижных и легкоподвижных форм. Для почвенной диагностики фосфатного питания важно иметь такой метод, который бы стал более чувствительным к изменениям в среде обитания, способен улавливать незначительные воздействия на почву при использовании минеральных удобрений или других аг-

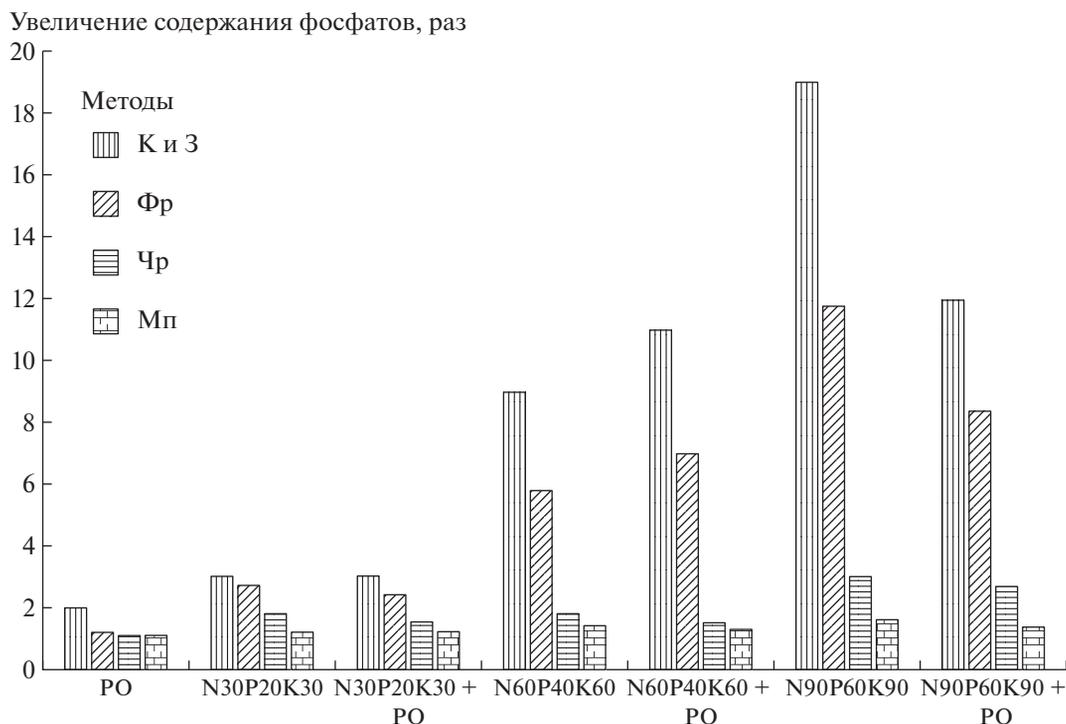


Рис. 1. Способность различных медов экстракции к извлечению подвижных фосфатов из почвы.

рохимикатов, применяющихся при оптимизации минерального питания растений. Такой способностью (по нашему мнению) обладает метод определения легкоподвижных фосфатов по Карпинскому и Замятиной, который улавливал количество почвенных фосфатов на минимальном уровне. При применении другого метода (по Францессону) содержание легкоподвижных фосфатов регистрировали на более высоком уровне. Выяснилось, что при запахивании растительных остатков и внесении минеральных удобрений метод определения легкоподвижных фосфатов по Карпинскому и Замятиной на серых лесных почвах среднесуглинистого гранулометрического состава, формирующихся в условиях Западной Сибири, оказался самым чувствительным, заметно уступал по этому показателю метод Францессона.

Под влиянием растительных остатков содержание легкоподвижных фосфатов в почве, определяемых по Карпинскому и Замятиной, возросло примерно в 2 раза, по Францессону – в 1.2 раза (рис. 1). Под воздействием минеральных удобрений изменения в содержании легкоподвижных фосфатов стали проявляться более четко, хотя регистрируемые показатели оказались недостаточно значимыми. В случае совместного применения минеральных удобрений в дозе N30P20K30 и заделки в почву растительных остатков измене-

ний в содержании легкоподвижных фосфатов практически не наблюдали. При использовании более высокой дозы удобрений до N60P40K60 существенно возросла величина содержания легкоподвижных фосфатов, определенных по методу Францессона и особенно по Карпинскому и Замятиной. Сочетание минеральных удобрений и растительных остатков заметно активизировало высвобождение большинства форм фосфатов из почвенных ресурсов в большей степени, чем при определении легкоподвижных форм по отдельности. Максимальное содержание легкоподвижных фосфатов в почве отметили при внесении N90P60K90, которое достигло 19-кратного увеличения. Однако добавление соломы в пахотный слой даже при таком соотношении между минеральными удобрениями (доза N90P60K90) и растительными остатками привело к снижению содержания фосфатов до 12-кратного уровня. Содержание подвижного P и особенно малоподвижного изменялось незначительно, вследствие чего эти формы почвенных фосфатов значительно сложнее использовать в диагностических целях.

Исследование изменения продуктивности зерновых культур под влиянием минеральных удобрений и растительных остатков показало, что оно во многом зависело от условий года (табл. 5). Самая низкая урожайность зерна была отмечена в

Таблица 5. Накопление биомассы зерновых культур при внесении минеральных удобрений в сочетании с растительными остатками, г/м²

Вариант	Овес, 2012 г.	Пшеница, 2013 г.	Ячмень, 2014 г.	Овес, 2015 г.	Пшеница, 2016 г.	Ячмень, 2017 г.	Овес, 2018 г.
Контроль	<u>166</u>	<u>305</u>	<u>594</u>	<u>570</u>	<u>334</u>	<u>358</u>	<u>970</u>
	78	104	268	220	102	162	354
Растительные остатки (PO)	<u>226</u>	<u>345</u>	<u>540</u>	<u>516</u>	<u>350</u>	<u>405</u>	<u>820</u>
	120	120	246	260	145	170	310
N30P20K30	<u>272</u>	<u>560</u>	<u>824</u>	<u>1090</u>	<u>434</u>	<u>655</u>	<u>1180</u>
	138	178	372	428	144	282	408
N30P20K30 + PO	<u>380</u>	<u>585</u>	<u>860</u>	<u>986</u>	<u>524</u>	<u>442</u>	<u>1170</u>
	204	188	378	372	182	286	406
N60P40K60	<u>440</u>	<u>585</u>	<u>1050</u>	<u>1170</u>	<u>484</u>	<u>858</u>	<u>1450</u>
	215	165	482	488	185	400	498
N60P40K60 + PO	<u>596</u>	<u>620</u>	<u>932</u>	<u>1240</u>	<u>564</u>	<u>920</u>	<u>1380</u>
	246	201	422	530	204	412	440
N90P60K90	<u>596</u>	<u>600</u>	<u>1220</u>	<u>1460</u>	<u>508</u>	<u>1230</u>	<u>1730</u>
	246	188	632	548	178	490	628
N90P60K90 + PO	<u>696</u>	<u>670</u>	<u>1220</u>	<u>1550</u>	<u>530</u>	<u>1260</u>	<u>844</u>
	338	208	580	650	192	562	650
HCP ₀₅	26	39	58	62	31	47	76

Примечание. Над чертой – общая биомасса, под чертой – зерновая продукция.

2012 г., затем она постепенно повышалась и достигла максимума в 2018 г. Запахивание растительных остатков существенно повышало урожайность овса (в 2012 и 2015 гг.) и пшеницы (в 2016 г.). В другие годы различия были незначительными, а иногда и наблюдали тенденцию к снижению урожайности, например, ячменя в условиях 2014 г.

Внесение минеральных удобрений в дозе N30P20K30 было во все годы эффективным, за исключением 2016 г. Дальнейшее повышение дозы удобрений отразилось на повышении урожайности не только ячменя, но и других зерновых культур. Увеличение дозы минеральных удобрений до N90P60K90 в сравнении с дозой N60P40K60 не всегда сопровождалось достоверной прибавкой урожайности, хотя тенденцию к ее повышению отмечали. При совместном внесении минеральных удобрений в максимальных дозах и растительных остатков наблюдали дальнейшее повышение урожайности зерновых культур (например, овса – в 2012 г., ячменя – в 2017 г.), либо иногда отмечали лишь тенденцию к увеличению зерновой продуктивности.

Различные условия минерального питания отразились на формировании надземной биомассы. Самое низкое ее накопление отмечали в условиях 2012 г. В последующие годы оно стало повышаться

и на 3-й год достигло максимальной величины. После этого на 4-й и 5-й год наблюдали снижение накопления надземной биомассы, особенно это отмечено у овса в условиях 2015 г., в другие годы наблюдали лишь тенденцию к снижению или увеличению синтеза биомассы. Применение минеральных удобрений даже в минимальной дозе вызывало значительное ее возрастание, которое наблюдали в течение всего периода проведения эксперимента. Повышение дозы удобрений в 2 раза в сочетании с растительными остатками обычно приводило к увеличению синтеза надземной биомассы. Применение самых высоких доз удобрений вызывало как возрастание, так и отсутствие достоверной прибавки в накоплении биомассы, что было связано с достаточно высоким уровнем содержания элементов минерального питания в почве при внесении N60P40K60 в сочетании с растительными остатками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение минеральных удобрений в сочетании с растительными остатками на серых лесных почвах Западной Сибири в течение 18 лет приводило к снижению содержания органического фосфора, но не сказывалось на содержании минеральных фосфатов. Изучение фракционного состава показало, что в ре-

зультате длительного внесения минеральных удобрений и заделки в почву растительных остатков происходило заметное накопление фосфатов во фракции Са-Р_I (кроме варианта N90P60K90) и Са-Р_{III} (во всех вариантах), в остальных фракциях существенных изменений не обнаружено.

Внесение минимальных удобрений и сочетание с соломой в меньшей степени отразилось на содержании легкоподвижных фосфатов, извлекаемых по методу Карпинского–Замятиной, и только усиление минерального питания позволило существенно изменить обеспеченность растений легкодоступными фосфатами, величину содержания которых после соответствующей обработки можно использовать в диагностических целях. Величина содержания малоподвижных фосфатов (экстрагируемых 1 н. НСI) во многом зависела от условий года, минерального питания и поступления в почву растительных остатков. Оказалось, что с усилением минерального питания увеличивалось содержание малоподвижных фосфатов, тогда как применение соломы нередко приводило к снижению содержания этих форм. После завершения ротаций севооборота установилось равновесное состояние малоподвижных фосфатов между их закреплением в минеральной основе и высвобождением фосфора из почвенных ресурсов.

Применение минеральных удобрений в малых дозах (N30P20K30) было эффективным в большинстве случаев: при дальнейшем увеличении дозы минеральных удобрений до N90P60K90 в сравнении с дозой N60P40K60 не всегда выявляли достоверную прибавку урожайности, хотя тенденцию к ее повышению отмечали во всех вариантах. При одновременном внесении минеральных удобрений в максимальных дозах и растительных остатков наблюдали дальнейшее повышение урожайности зерновых культур (например, овса – в 2012 г., ячменя – в 2017 г.), либо отмечали лишь тенденцию к увеличению зерновой продуктивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бараев А.И.* Почвозащитное земледелие. Избр. тр. М.: Агропромиздат, 1988. 383 с.
2. *Юшкевич Л.В.* Использование соломы и различных приемов обработки почвы в засушливом земледелии Западной Сибири // Нивы Зауралья. 2013. № 39. С. 80–83.
3. *Волынкин В.И., Волынкина О.В.* Взаимодействие азота и фосфора в удобрении мягкой яровой пшеницы при технологии бесменного возделывания и оставления соломы на поле // Агрохимия. 2018. № 3. С. 34–42.
4. *Турусов В.И., Богатых О.А., Дронова Н.В., Балюнова Е.А.* Роль пожнивно-корневых остатков в восстановлении плодородия почвы // Плодородие. 2020. № 4. С. 10–12.
5. *Гамзикова О.И.* Генетика агрохимических признаков пшеницы. Новосибирск: СО РАСХН, 1994. 220 с.
6. *Антипина Л.П., Пашкович Н.К.* Закономерности фосфора в почвенном покрове Западной Сибири // Фосфатный режим почв Сибири. Новосибирск, 1985. С. 3–9.
7. *Heming S.D.* Phosphorus balances for arable soils in Southern England // Soil Use Manag. 2007. V. 23. № 2. P. 162–170.
8. *Назарюк В.М.* Почвенно-экологические основы оптимизации питания растений. Новосибирск: Изд-во СО РАСХН, 2007. 364 с.
9. *Сушеница Б.А.* Фосфатный уровень почв и его регулирование. М.: Колос, 2015. 365 с.
10. *Синягин И.И., Кузнецов Н.Я.* Применение удобрений в Сибири. М.: Колос, 1979. 373 с.
11. *Гамзиков Г.П., Ильин В.Б., Назарюк В.М.* Агрохимические свойства почв и эффективность удобрений. Новосибирск: Наука, СО, 1998. 252 с.
12. *Минеев В.Г.* Экологические проблемы агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 285 с.
13. *Кудяров В.Н., Семенов В.М.* Оценка современного вклада удобрений в агрогеохимический цикл азота, фосфора и калия // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1440–1446.
14. *Давлятин И.Д., Лукманов А.А., Маметов М.И.* Источники фосфора и оценка их вклада в подвижный фонд этого элемента в пахотных почвах в лесостепной зоне // Достиж. науки и техн. АПК. 2018. Т 32. № 4. С. 2–24.
15. *Билтуев А.С., Будажапов Л.В., Уланов А.К.* Особенности изменения фосфатного режима каштановых почв Забайкалья при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2021. № 8. С. 3–8.
16. *Бурлакова Л.М.* Плодородие Алтайских черноземов в системе агроценоза. Новосибирск: Наука, СО, 1984. 196 с.
17. *Якутина О.П.* Изменение фосфатного фонда черноземных почв Западной Сибири под влиянием водной эрозии // Агрохимия. 2006. № 2. С. 16–21.
18. *Кочергин А.Е.* Эффективность удобрений на черноземах Западной Сибири // Агрохимическая характеристика почв СССР: Районы Западной Сибири. М.: Наука, 1968. С. 316–336.
19. *Аникина А.П., Чернобай Т.Н., Малков В.П.* Изменение агрохимических свойств черноземов Левобережной части Приобского плато при орошении и систематическом применении минеральных удобрений // Агрохимия. 1988. № 10. С. 114–122.

20. Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р. Фосфатное состояние эродированных лугово-черноземных почв и эффективность фосфорных удобрений в условиях Западной Сибири // *Агрохимия*. 2019. № 6. С. 3–13.
21. Панфилов В.П., Ландина М.М., Каретин Л.Н. Агрофизическая характеристика почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука, СО, 1976. — 544 с.
22. Антипина Л.П. Фосфор в почвенном покрове Западной Сибири // *Агрохимия*. 1988. № 5. С. 20–28.
23. Берхин Ю.И., Чагина Е.Г., Янцен Е.Д. Фракционный состав минеральных фосфатов почв Западной Сибири // *Агрохимия*. 1984. № 9. С. 21–27.
24. Славина Т.П., Иванова Р.Г. Фракционный состав минеральных фосфатов пойменных почв Средней Оби // *Агрохимия*. 1984. № 5. С. 20–26.
25. Гырбучев И. Регулирование фосфатного режима в основных почвах Болгарии. М.: Колос, 1981. 240 с.

Application of Mineral Fertilizers and Plant Residues for Regulation of Phosphate Nutrition and Productivity of Grain Crops

V. M. Nazariuk^a and F. R. Kalimullina^{a, #}

^a*Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS
prosp. acad. Lavrentieva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

[#]*E-mail: kalimullina@issa-siberia.ru*

In the microfield crop rotation on gray forest soil, the dynamics of the main forms of phosphorus available to plants during the application of mineral fertilizers and plant residues has been studied. The greatest changes in the forms of soil phosphates occurred when using mineral fertilizers in doses of N60P40K60 and N90P60K90. The introduction of plant residues caused both an increase and a decrease in the content of easily mobile forms of the element. The maximum changes in these forms of phosphates in the soil were noted when using the Karpinsky and Zamyatina method. The productivity of plants increased in the case of the use of mineral fertilizers, the embedding of plant residues in the soil caused both an increase and a decrease in plant productivity.

Key words: soil, fertilizer, phosphorus forms, soil diagnostics, plant, crop rotation, yield.