

УДК 631.85:631.816

ОКУПАЕМОСТЬ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ С УЧЕТОМ ИХ ДЛИТЕЛЬНОГО ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ¹

© 2023 г. О. В. Волюнкина

*Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения РАН
620142 Екатеринбург, ул. Белинского, 112а, Россия**E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru*

Поступила в редакцию 03.04.2023 г.

После доработки 12.05.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

В 52-летнем стационарном опыте на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ изучили действие и последствие фосфорного удобрения на фоне внесения азота. Доза Р40 в сочетании с азотом, вносимая 25 лет в зернопропашном севообороте кукуруза—две пшеницы—овес (в сумме Р1000), после прекращения применения оказывала длительное последствие в посеве бессменной пшеницы после стерни. В эксперименте оценена экономическая эффективность действия и последствие дозы фосфора Р1000. С учетом 27-летнего последствие окупаемость фосфора дозы Р40, добавленной к N40—50, повысилась с 9.0 до 15.5 кг/кг.

Ключевые слова: зернопропашной севооборот, бессменная пшеница после стерни, фосфорное удобрение, действие, последствие удобрения, урожайность культур, окупаемость удобрения.

DOI: 10.31857/S0002188123110157, **EDN:** PWRZKJ

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность азотных и фосфорных удобрений тесно взаимосвязана. На выщелоченном черноземе, бедном подвижным фосфором, добавление фосфора к азоту повышает урожайность яровой пшеницы в 1.6–2.6 раза [1]. Оптимальное содержание подвижного фосфора в почве в некоторых литературных источниках завышено. Например, в работе Алексеевой для черноземов разных зон Украины рекомендовано достижение содержания высокого уровня фосфора — 100–180 мг/кг [2]. По данным ученых Тамбовского НИИСХ, при изучении 3-х уровней содержания P_2O_5 все 3 уровня были повышенными: 96, 122 и 157 мг/кг. Уже на 5-й год удобрение действовало слабо, а на 3-м фоне не давало существенных прибавок урожая [3].

В исследованиях, посвященных оптимизации доз азота и фосфора на обыкновенных и южных черноземах, соавторы составили таблицу подбора доз для 3-х фонов обеспеченности подвижным P_2O_5 и 3-х уровней наличия нитратов внутри каждого из фосфорных фонов. Среди многих вариантов внесения НРК в исследованиях этих авторов более эффективной была экономная смесь N33P19K9 [4, 5].

В России на 01.01.2019 г. насчитывалось почв пашни с очень низким и низким содержанием подвижного фосфора 26%, средним — 34% [6]. Курганская обл. выделяется среди разных регионов России низким содержанием подвижного фосфора в почве. В Нечерноземной зоне есть примеры, когда за счет активного применения фосфорных удобрений доля бедных фосфором почв снижена с 51.9 в 1971 г. до 21.7% в 2010 г. [7]. В Курганской обл. подобный эффект тоже отмечен, например, в 1-м туре обследования почв в 1966–1972 гг. бедных подвижным фосфором почв насчитывали 74%, но за счет внесения удобрений их доля к 1995–1999 гг. снизилась до 40%. В дальнейшем с уменьшением использования удобрений к 2016 г. низкие запасы подвижного фосфора составили 62% пашни [8]. При этом много сельскохозяйственных предприятий вносят только азотные удобрения. Насколько повышается эф-

¹ Исследование выполнено в Курганском НИИСХ — филиале УрФАНИЦ УрО РАН в лабораториях агрохимии и земледелия в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования по теме № 0532-2021-0002 “Усовершенствовать систему адаптивно-ландшафтного земледелия для Уральского региона и создать агротехнологии нового поколения на основе минимизации обработки почвы, диверсификации севооборотов, рационального применения пестицидов и биопрепаратов, сохранения и повышения почвенного плодородия и разработать информационно-аналитический комплекс компьютерных программ, обеспечивающий инновационное управление системой земледелия”.

фективность азота при совместном его применении с фосфором или на окультуренном по фосфору фоне, показали полевые опыты Курганского НИИСХ [9, 10]. За счет малой подвижности фосфора удобрений он оказывает длительное последствие (22–32 года) после прекращения применения фосфорного удобрения [11].

Цель работы — анализ действия и последствия фосфорных удобрений на величину урожайности сельскохозяйственных культур за 52 года стационарного опыта.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент заложен в 1971 г. заведующим отделом агрохимии В.И. Волынкиным на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ. Автор работы — исполнитель этого опыта с 1993 г. по настоящее время. Исследование в течение 7-ми ротаций в 1971–1998 гг. вели в зернопропашном севообороте с чередованием культур кукуруза—пшеница—пшеница—овес. Культуры выращивали при ежегодной вспашке. Последний посев кукурузы был в 1995 г., далее бессменно сеяли пшеницу. В конце этого периода в земледельческой практике Курганской и других областей произошли изменения — сокращение посевов кормовых культур и объемов проведения вспашки. Для изучения нового агрофона в 2000 г. севооборот в опыте был заменен бессменной пшеницей, высеваемой после стерни.

Стационарному опыту 52 года. Почва на участке — выщелоченный чернозем маломощный малогумусный среднесуглинистый. Агрохимические свойства почвы в слое 0–20 см: pH_{KCl} 6.2–6.4 ед. при закладке и 5.0–5.2 ед. — в настоящее время, содержание гумуса — 4.5%, суммы кальция и магния — 20–22 мг-экв/100 г, общего азота — 0.20%, общего фосфора — 0.07%, содержание подвижных P_2O_5 и K_2O — 40 и 250–300 мг/кг почвы соответственно. Азотное удобрение в опыте — аммонийная селитра в средних в севообороте дозах $\text{N}_{25-50-75}$ и $\text{N}_{20-40-60}$ на бессменной пшенице; соответственно фосфорное удобрение в этих вариантах опыта — суперфосфат P_{40} и аммофос P_{20} (с перерывом на 12 лет в 1996–2007 гг.). Удобрения вносили до посева дисковой сеялкой СЗ–3.6 на глубину 4–5 см. Среднегодовые осадки в центральной зоне Курганской обл. равны 350 мм и за май–август — 190 мм при часто повторяющихся засухах в июне или июле. За годы проведения исследования в севообороте было 20 благоприятных по увлажнению растений лет, за период выращивания бессменной пшеницы — 7 лет, в такие годы с

помощью азотно-фосфорного удобрения ее урожайность повышалась до 20–28–32 ц/га.

Почву отбирали весной перед внесением новых доз удобрения, т.е. определяли их остаточное количество. Содержание подвижного P_2O_5 в слое 0–20 см почвы под влиянием ежегодного применения суперфосфата в севообороте в течение 1971–1995 гг. в смесях $\text{N}_{50}\text{P}_{40}$ и $\text{N}_{50}\text{P}_{40}\text{K}_{40}$ повысилось до 100–110 мг/кг. В 1996–2007 гг. фосфорное удобрение, как уже упоминали, не вносили и применяли один азот. Бессменная пшеница в эти годы использовала последствие (Пос) доз P_{40} и $\text{P}_{40}\text{K}_{40}$ на азотном фоне, эффективность которых была близкой по влиянию на урожайность. Постепенно содержание P_2O_5 в почве снизилось до 70–80 мг/кг. Поэтому в 2008–2022 гг. снова стали применять фосфорные удобрения на фоне комбинации NP в виде аммофоса P_{20} , а в вариантах NPK продолжили учет последствия фосфора и калия (Пос PK), длительность которого важно было установить. Поскольку содержание калия в почве на участке под опытом высокое, проявление последствия относим в основном к фосфору. К 52-му году исследования сумма внесенного фосфора в вариантах NPK составила P_{1000} , NP — P_{1300} . Среднегодовые дозы фосфора к 2022 г. на 2-х сравниваемых фонах равнялись P_{19} и P_{25} . Схема опыта предусматривала сравнение в годы севооборота 3-х севооборотных доз азота — $\text{N}_{25-50-75}$ без фосфора и совместно с P_{40} и $\text{P}_{40}\text{K}_{40}$. В посевах бессменной пшеницы применяли дозы азота $\text{N}_{20-40-60}$ без фосфора и на фонах внесения P_{20} , а также и исследовали эффект Пос PK .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для объективной оценки влияния 2-х фосфорных фонов следует их сравнить с самого начала формирования. В годы севооборота в посеве кукурузы, как и овса, варианты NP и NPK были равноценными. В посеве пшеницы добавление калия к азотно-фосфорному удобрению имело небольшое преимущество. Внесение одного азота на почве, бедной подвижными фосфатами, проигрывало в посевах всех культур севооборота. К контролю прибавки урожайности от азотно-фосфорного и полного минерального удобрения при второй дозе азота были равны: кукурузы — 3.6 и 3.8 ц з.е./га, 1-й и 2-й пшеницы после кукурузы — в среднем 5.7 и 6.6, овса — 3.2 и 3.6 ц з.е./га. По сравнению с внесением только азотного удобрения совместное внесение азота и фосфора давало дополнительно в годы севооборота прибавку урожайности: кукурузы — 2.0–2.2, пшеницы —

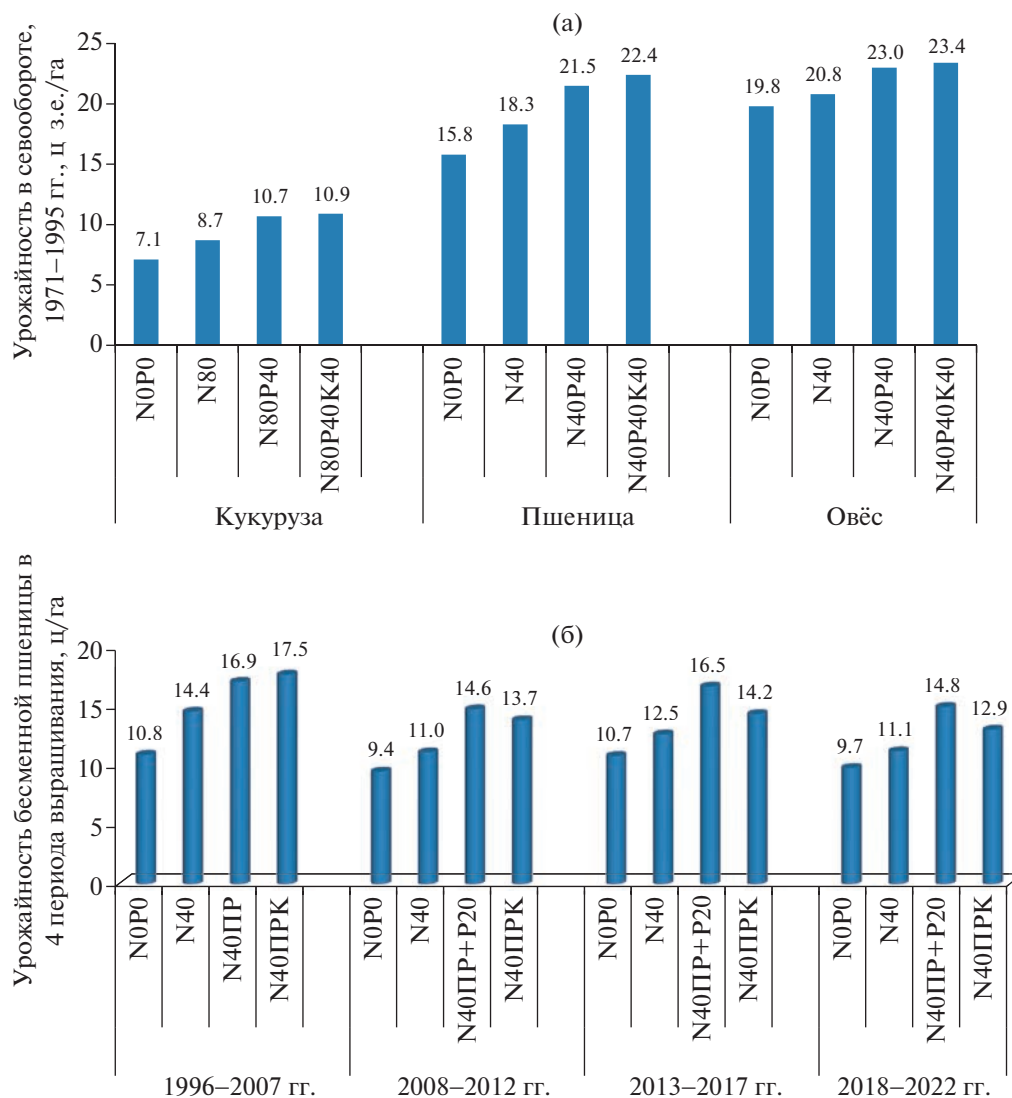


Рис. 1. Урожайность при разном составе удобрения: (а) – сельскохозяйственных культур зернопропашного севооборота (1971–1995 гг.), (б) – бесменной пшеницы (1996–2022 гг.), ц з.е./га.

3.2–4.1 и овса – 2.2–2.6 ц з.е./га. На рис. 1а показано действие и последствие 2-х фосфорных фонов в сочетании со 2-й дозой азота.

Данные последующих лет посева бесменной пшеницы разбиты на 4 периода, в 1-й из них фосфор не вносили, поэтому оценили последствие суперфосфата на пшенице, урожайность оказалась близкой на разных фонах с преимуществом фона NPK перед NP всего в 0.6 ц/га (рис. 1б).

Далее в течение 3-х периодов восстановили фосфорные фоны. В комбинации с применением NP и сравнением этого фона с последствием (Пос) фосфора в вариантах NPK применение P20 в 2008–2012 гг. увеличило урожайность в среднем по сравнению с фоном последствия на ≈ 1 ц/га, в течение

следующих 2-х периодов – на 2.1 и 1.9 ц/га соответственно.

Более подробный анализ сравнения этих фонов вскрыл очень важную закономерность взаимодействия фосфора с дозой азота. Применение одного азота в посеве бесменной пшеницы на бедной фосфатами почве в среднем за время восстановления фосфорного фона (15 лет) повышало ее урожайность на 1.4–1.7 ц/га (табл. 1). Увеличение дозы с N20 до N40–60 при отдельном внесении азота всегда оказывалось нецелесообразным. Добавление фосфора существенно изменяло продуктивность пшеницы, но его действие зависело от дозы азота, повышая урожайность культуры на 1.5 – при 1-й дозе и на 2.2–2.1 ц з.е./га – при 2-х следующих. Одно и то же количество добав-

Таблица 1. Урожайность бессменной пшеницы при разном составе удобрения, ц зерна/га

Год/ Вариант	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Среднее	+/- к контролю
Контроль	5.2	11.2	7.5	18.3	4.8	9.8	8.9	7.9	10.2	16.8	8.4	8.0	8.6	2.2	21.3	9.9	—
N20	5.7	12.3	9.1	20.9	6.5	11.5	10.2	7.7	11.4	20.1	9.6	8.7	8.3	3.2	24.9	11.3	1.4
N20ПосР	6.8	14.1	10.6	23.4	7.5	13.3	13.0	8.7	13.6	20.9	10.5	10.9	9.7	3.2	26.2	12.8	2.9
N20ПосР + P20	6.0	13.1	9.8	24.5	6.5	13.8	13.5	9.0	13.9	22.8	11.9	12.7	11.3	2.7	28.9	13.4	3.5
N40	5.6	12.9	8.9	21.2	6.2	11.8	11.6	7.5	12.5	20.9	9.9	9.3	8.6	2.5	25.3	11.6	1.7
N40ПосР	6.6	15.8	11.6	27.9	6.5	13.5	14.3	8.9	13.7	23.9	12.1	11.6	11.0	2.5	27.3	13.8	3.9
N40ПосР + P20	6.3	16.8	12.3	30.6	6.8	14.6	16.2	10.0	15.7	26.2	12.6	13.5	12.2	3.3	32.2	15.3	5.4
N60	4.2	11.9	9.6	21.5	6.3	11.3	6.2	8.0	12.0	22.1	12.3	10.3	7.9	2.7	26.0	11.5	1.6
N60ПосР	6.7	16.3	11.7	27.1	7.1	12.4	8.0	9.7	13.6	25.2	11.0	13.2	10.6	2.7	28.7	13.6	3.7
N60ПосР + P20	6.3	17.5	12.3	30.6	6.9	14.6	10.0	10.3	14.0	30.5	14.1	16.3	12.1	3.1	29.8	15.2	5.3
НСР ₀₅	1.4	2.0	2.2	3.2	1.2	2.1	3.2	1.45	1.4	2.7	2.0	1.9	1.2	0.6	3.2		0.96

Примечания. 1. Пос — последствие. Первый год внесения добавочной дозы Р20 (2008) — засушливый, как и 2012, 2021 г. 2. НСР₀₅ фактора дозы азота — 0.96, фактора эффект Р20 — 0.59 ц зерна/га.

ленного к азоту фосфора Р300 обеспечило за 15 лет очень разные суммы прибавок — 22.5 ц зерна/га в сочетании с N20, 33.0 — при N40 и 31.5 ц зерна/га — на фоне N60. Поэтому окупаемость 1 кг фосфора с переходом фоновой дозы азота от N20 к N40—60 увеличивалась с 7.5 до 11.0 и 10.5 кг зерна. Поначалу отзывчивость пшеницы на добавление Р20 к первой дозе азота N20 отмечали только в годы формирования высокой урожайности, как это было в 2011 и 2017 гг. По мере истощения фона последствия фосфора положительная реакция стала проявляться и при умеренной урожайности пшеницы. За 15 лет при этой дозе азота лишь 5 раз отмечена прибавка от Р20 не менее 1 ц/га зерна, при более высоких дозах азота N40—60 — 9—10 раз.

При суммировании годовых прибавок от действия фосфора в дозе Р40 соответственно 3-м азотным фонам (2.1, 3.6 и 4.4 ц з.е./га) и его последствия (1.3, 2.6 и 3.2 ц з.е./га) получено 3.4; 6.2 и 7.6 ц з.е./га. Окупаемость 1 кг фосфора прибавками урожайности культур в период севооборота составила 5.2, 9.0 и 11.0 кг з.е. С учетом последствия фосфора в посевах бессменной пшеницы

оплата существенно возросла, также различаясь в зависимости от фонов 3-х доз азота: 8.5, 15.5 и 19.0 кг з.е./кг д.в. суперфосфата (табл. 2).

Уровень существенных прибавок урожайности от применения Р40 как в годы действия, так и последствия, зависел от условий увлажнения периода вегетации и дозы азота. Например, в годы севооборота по мере возрастания дозы азота повторяемость более высоких прибавок повышалась с 60% лет до 76—80%, в годы последствия соответственно — с 41 до 70%.

Более обоснованно делать заключение о сроке возобновления применения фосфора лучше не по одному опыту. В Курганском НИИСХ есть эксперимент, где прослежено за последствием 3-х суммарных доз фосфора Р240—360—720, внесенных в запас в половинных дозах в 1971 и 1975 гг. в зернопаровом севообороте пар—пшеница—пшеница—овес. Последствие 3-х разных количеств запасного внесения фосфора проявлялось 27—39—45 лет в одной из закладок опыта и 34—34—44 года — во второй. Исключая годы с паром, последствия первого фона хватило в 2-х закладках опыта

Таблица 2. Суммарный эффект действия и последействия дозы Р40 за 52 года

Два периода исследования	Показатель	Доза азота в севообороте и в посеве бессменной пшеницы		
		N25–20	N50–40	N75–60
Действие в севообороте, ц з.е./га (1971–1995 гг.)	Прирост от азота за год	1.4	1.6	1.4
	прибавка от добавленной дозы Р40	2.1	3.6	4.4
	Оплата Р40, кг/кг	5.2	9.0	11.0
Последействие в посеве бессменной пшеницы, ц з.е./га (1996–2022 гг.)	Прирост от азота за год	1.9	2.3	2.4
	прибавка от последействия Р40	1.3	2.6	3.2
Общий прирост за год от Р40 за 52 года, ц з.е./га		3.4	6.2	7.6
Окупаемость с учетом последействия Р40, кг/кг		8.5	15.5	19.0

на 20–25 посевов, второго – на 25–29 и третьего – на 33–34. Среднегодовое количество внесенного фосфора к этим срокам уменьшалось до Р9–9–16 в одном из полей опыта и до Р7–10–16 в другом [12]. Можно считать, что уже при снижении среднегодовой дозы до Р10–16 следует возобновлять применение фосфорных удобрений.

На основании результатов этих двух опытов В.И. Волынкиным была откорректирована для местных условий шкала Чирикова по наличию подвижного фосфора в слое 0–20 см почвы. В ней уровни содержания подвижного P_2O_5 (мг/кг) делятся следующим образом: очень низкое – <20, низкое – 20–45, среднее – 45–60, повышенное – 60–80 и высокое – >80 [13].

В посевах бессменной пшеницы в среднем за последние 14 лет содержание подвижного фосфора в слое 0–20 см почвы оказалось следующим: в контроле – в среднем 48 мг/кг (при изменениях по годам от 36 до 64), при внесении одного азота – 40 мг/кг (от 32 до 47), в варианте с Р19, в котором все еще в течение 27 лет отмечали последействие фосфора, – 61 мг/кг (от 57 до 70) и на фоне Р25 – 86 мг/кг (от 77 до 112).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты исследования свидетельствовали о тесном взаимодействии фосфорного удобрения с дозой азота. Эта закономерность проявлялась в севообороте и при выращивании бессменной пшеницы после стерни. С повышением дозы азота с N20 до N40–60 потребность растений в фосфоре возрастала, и число лет с существенным приростом урожайности увеличивалось с 5 до 9–10. Длительность последействия фосфора зависела от дозы применения удобрения и уровня урожайности культур. Дозы Р240–360–720 в одном из опытов Курганского НИИСХ ока-

зывали положительное последействие в посевах пшеницы. В другом опыте от дозы Р1000 в течение 27 лет проявлялось последействие фосфора.

Надежным ориентиром необходимости возобновления применения фосфора является установление среднего количества от внесенного ранее фосфора, приходящегося на год, ко времени, когда принимают решение о внесении фосфорного удобрения. При снижении этой величины до Р10–16, а также при уменьшении содержания подвижного P_2O_5 до 50–60 мг/кг следует вновь применять фосфорное удобрение.

Оплата Р40 в севообороте на 1 кг д.в. суперфосфата соответственно 3-м фонам азота N25–50–75 составила 5.2, 9.0 и 11.0 кг з.е. С учетом последействия фосфорного удобрения в посевах бессменной пшеницы она повысилась до 8.5, 15.5 и 19.0 кг зерна/кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шафран С.А. Влияние типа почвы и содержания подвижных фосфатов на эффективность фосфорных удобрений // Агрохимия. 2015. № 3. С. 26–33.
2. Алексеева Д.М. Основные итоги и задачи исследований по установлению оптимальных параметров уровня плодородия почв в интенсивном земледелии / Регулирование плодородия почв, круговорота и баланса питательных веществ в земледелии СССР. М., 1981. С. 170–175.
3. Вислобокова Л.Н., Скорочкин Ю.П., Иванова О.М. Эффективность удобрений под озимую пшеницу в зависимости от содержания фосфора в почве // Комплексное применение средств химизации в адаптивно-ландшафтном земледелии. Мат-лы 44-й Международ. научн. конф. молод. ученых и специалистов 22–23 апреля 2010 г. (ВНИИА). М.: ВНИИА, 2010. С. 39–40.
4. Чуб М.П., Пронько В.В., Сайфулина Л.Б., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф. Плодородие чернозема южного и продуктивность зернопарового севообо-

- рота при длительном применении минеральных удобрений // *Агрохимия*. 2010. № 7. С. 3–13.
5. Чуб М.П., Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю. Оптимизация доз азотных и фосфорных удобрений на черноземных почвах Поволжья с различным содержанием фосфора // *Плодородие*. 2017. № 2. С. 8–11.
 6. Сычев В.Г., Аканова Н.М. Агроэкологическая оценка эффективности аммофоса в технологии возделывания различных культур // *Плодородие*. 2020. № 1 (112). С. 3–6.
 7. Шафран С.А. Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны и ее резервы // *Агрохимия*. 2016. № 8. С. 3–10.
 8. Состояние плодородия пашни Курганской области на 01.01.2016 года в картограммах, диаграммах и таблицах. Курган, 2016. 27 с.
 9. Емельянов Ю.Я., Копылов А.Н., Волынкина О.В., Кириллова Е.В. Приемы эффективного использования фосфорного удобрения // *Агрохимия*. 2014. № 7. С. 27–32.
 10. Волынкин В.И., Волынкина О.В. Влияние удобрений на урожайность яровой пшеницы в бессменных посевах по стерне // *Агрохимия*. 2014. № 12. С. 24–30.
 11. Иванов А.Л., Сычев В.Г., Державин Л.М., Адрианов С.Н., Бражникова Н.В., Карпова Д.В., Карпунин А.И., Кирпичников Н.А., Конончук В.Д., Самойлов Л.Н. Способы, сроки и формы внесения фосфора в агроценозе // *Агробιοгеοхимический цикл фосфора* / Под ред. А.Л. Иванова. М.: РАСХН, 2012. С. 299–321.
 12. Волынкин В.И., Волынкина О.В., Кирилова Е.В. Пути управления системой удобрения зерновых культур в зернопаровом севообороте // *Эконом. сел.-хоз. и перераб. предприятий*. 2019. № 7. С. 61–66.
 13. Волынкин В.И., Волынкина О.В., Данилова Л.Ф., Новоселов В.П., Попова Л.П., Емельянов Ю.Я., Притчин А.Н. Научные основы системы удобрения сельскохозяйственных культур в севообороте // *Научные основы систем земледелия Курганской области: рекомендации*. Курган, 2001. С. 62–110.

Payback of Phosphorus, Taking into Account Its Long-Term Aftereffect

O. V. Volynkina

*Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the RAS
ul. Belinskogo 112a, Yekaterinburg 620142, Russia*

E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru

In a 52-year stationary experiment at the Central Experimental Field of the Kurgan Research Institute, the effect and aftereffect of phosphorus fertilizer against the background of nitrogen application were studied. A dose of P40 in combination with nitrogen, introduced for 25 years in the corn—two wheat—oats crop rotation (in the amount of P1000), after discontinuation of use, had a long aftereffect in sowing permanent wheat after stubble. In the experiment, the economic efficiency of the action and aftereffect of a dose of phosphorus P1000 was evaluated. Taking into account the 27-year aftereffect, the payback of the phosphorus dose of P40 added to N40–50 increased from 9.0 to 15.5 kg/kg.

Keywords: grain-tillage crop rotation, permanent wheat after stubble, phosphorus fertilizer, effect, aftereffect of fertilizer, crop yield, fertilizer payback.