

УДК 631.816.1:631.85:633.1(571.1)

ОПТИМАЛЬНЫЕ ДОЗЫ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ ДЛЯ ЗЕРНОВЫХ АГРОЦЕНОЗОВ ПРИОБЬЯ

© 2024 г. С. А. Колбин¹, А. А. Данилова^{1,*}, А. Г. Рахленко¹¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН
630501 Новосибирская обл., р.п. Краснообск, ул. Центральная, 26, Россия

*E-mail: Danilova7alb@yandex.ru

Необходимость интенсификации аграрного сектора для обеспечения продовольственной безопасности растущего населения планеты на фоне истощения природных источников фосфоритного сырья приводит к увеличению затрат сельхозпроизводителей на фосфорные удобрения (ФУ), что повышает актуальность проблемы оптимизации доз применения последних. На основе обобщения результатов многолетних полевых опытов сравнили экономическую и экологическую обоснованность разных подходов к расчету доз ФУ под зерновые культуры в Приобье. Исследование провели в 2006–2017 гг. в многолетних опытах СФНЦА РАН на черноземе выщелоченном среднесуглинистом среднегумусном в Центральной лесостепи Приобья (54°53'13.5" с.ш. и 82°59'36.7" в.д.). Расчеты выполнены по результатам наблюдений в 3-х севооборотах: 3-польном зернопаровом (пар–пшеница–пшеница), в 4-польном зернопаровом (пар–пшеница–пшеница–ячмень), в 4-польном зернопаровом (пар–пшеница–пшеница–пшеница). Длительность опытов равна соответственно 18, 23, 38 лет. Опыты проведены на фоне внесения азотных удобрений при полной схеме защиты растений от вредных организмов. Установлена высокая агрономическая эффективность внесения ФУ: прибавка урожайности зерна при применении P15–P30 в среднем составила 0.5–1.2 т/га. Вынос фосфора урожаем зерна (отчуждение его с поля) в контрольных вариантах составлял ≈ 20 кг P₂O₅/га севооборотной площади, в вариантах с внесением удобрений достигал 30 кг/га. Вынос его надземной биомассой был в 1.6 раза больше и достигал 48 кг/га. Баланс фосфора в почве в вариантах опытов без внесения ФУ был дефицитным (–15–27 кг/га), при внесении P15 дефицит его составил –11 кг/га, при дозе P30 сальдо баланса было положительным, т.е. поступление фосфора было избыточным. Свидетельством избыточности доз ФУ >P30 для зерновых агроценозов в лесостепи Приобья считали 2 показателя: накопление в почве подвижного минерального фосфора и увеличение фракции ферментативно доступного фосфора, эти пулы могут стать источником потерь фосфора из агроценоза. Сделан вывод, что для чернозема выщелоченного Приобья расчет доз фосфорных удобрений на основе величины отчуждения фосфора урожаем зерна является более обоснованным с экономических и экологических позиций в сравнении с расчетом на основе величины выноса элемента всей надземной (зерно + солома) биомассой растений.

Ключевые слова: фосфорные удобрения, агроценоз, севооборот, зерновые культуры, отчуждение фосфора урожаем зерна, вынос фосфора надземной биомассой, баланс фосфора в почве.

DOI: 10.31857/S0002188124080032, **EDN:** CEOYYN

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что основным источником фосфора для сельскохозяйственного производства являются полезные ископаемые (фосфоритные руды), 60% запасов которых может быть исчерпано к 2100 г. При этом мировой спрос на сельскохозяйственную продукцию с 2005 по 2050 г. может увеличиться на 100–110% [1–3]. Для поддержания глобальной продовольственной безопасности потребуется дальнейшая интенсификация аграрного сектора экономики. Соответственно возрастет потребность в фосфорных удобрениях, вследствие

чего станет выраженной тенденция к увеличению затрат на удобрения [4]. В этих условиях для поддержания прибыльности сельского хозяйства крайне важно повысить эффективность использования фосфорных удобрений [5].

В мире базовым критерием при применении фосфорных, как и других, удобрений является высокая эффективность их использования растениями. То есть стоимость удобрений должна окупаться прибавкой урожая. В этом контексте последние годы идет интенсивный поиск определения оптимальных доз фосфорных удобрений

в зависимости от вида культуры, особенностей почвенно-климатических и агротехнических условий [6]. При этом признают, что экономически оптимальные дозы удобрений позволят смягчить остроту ряда экологических проблем [3, 7].

В РФ исторически сложился иной подход, основанный на концепции расширенного воспроизводства почвенного плодородия, — дозы удобрений должны не только обеспечить урожайность, но и способствовать улучшению агрохимических свойств почвы [8].

Дискуссионные вопросы, связанные с оптимизацией доз фосфорных удобрений, тесно связаны с подходами к оценке баланса фосфора в земледелии. Существует концепция, что баланс фосфора должен быть положительным с превышением поступления его над выносом не менее, чем на 50%. Утверждают, что при низком содержании подвижного фосфора в большинстве почв РФ и низкой усвояемости фосфора удобрений для поддержания почвенного плодородия поступление этого элемента должно превышать вынос урожаем не менее чем в 2.0–2.5 раза [9]. Недостаточная экспериментальная обоснованность этого утверждения, по мнению [10], связана с тем, что принятые в 1988 г. нормативы окупаемости минеральных удобрений на зерновых культурах, составляющие 3–5 кг зерна за 1 кг д.в., были получены в краткосрочных полевых опытах, без учета последствий удобрений и при низком технологическом уровне их проведения.

В практическом плане расчет доз удобрений, необходимых для достижения положительного баланса фосфора в почве, предлагали проводить на основе учета планируемого урожая и желаемого изменения содержания подвижных форм элемента в почве (формула Постникова) [11]. В последующие годы данный подход фактически не использовали в земледельческой практике [9]. Однако и в настоящее время все еще продолжают исследования, посвященные данной тематике. Например, в работе [12] указано, что для повышения содержания элемента на 1 мг P_2O_5 /кг почвы в зависимости от типа почвы необходимо вносить от 5 до 12 кг P_2O_5 /га. Примерно такие же данные приведены в работе [13]. На основе этих рекомендаций авторы предлагают, что для перевода почв с низким и средним содержанием подвижного фосфора в более высокую категорию в течение 10–12 лет необходимо вносить дозы фосфорных удобрений, превышающие вынос элемента в 2 раза, что позволит ежегодно повышать содержание подвижного фосфора в почве на 3–4 мг/кг. Авторы данного сценария планируют, что в среднем в РФ доза внесения минеральных удобрений к 2030 г. должна составлять 150–160 кг д.в./га, т.е. увеличиться в 3 раза по сравнению с 2016 г. (49 кг д.в./га). Вне зоны внимания этих авторов остается экономическая и экологическая

обоснованность внесения таких высоких доз удобрений. Выход из данной ситуации, на наш взгляд, заключается в том, что определяющим фактором для обоснования доз удобрений должны признать увеличение продуктивности сельскохозяйственных культур.

В настоящее время существуют 3 основных подхода для расчета доз фосфорных удобрений: 1 — дозы, обеспечивающие положительный баланс фосфора в почве (дозы фосфорных удобрений, обеспечивающие превышение поступления его над выносом не менее чем на 50%), 2 — дозы, обеспечивающие вынос фосфора зерном и соответствующим количеством побочной продукции (соломой), 3 — дозы, компенсирующие вынос фосфора урожаем зерна (хозяйственный вынос). Первый подход наряду с повышением урожайности предусматривает повышение агрохимических показателей плодородия почвы. Последние 2 подхода направлены только на обеспечение потребности растений в доступных элементах питания (в данном случае фосфора). В практике расчета доз удобрений чаще всего используют методы расчета доз удобрений, основанные на 2-м подходе, т.е. на суммарном выносе элемента зерном и побочной продукцией культуры. Считается, что при данном подходе обеспечивается вынос элемента надземной биомассой растений, необходимый для достижения планируемой урожайности культуры. Этот метод не учитывает некоторые важные моменты, связанные со спецификой использования растениями фосфора удобрений: 1 — величину выноса элемента подземной биомассой растений, 2 — вариацию коэффициента использования элемента как из почвы, так и удобрений, в зависимости от условий увлажнения в течение вегетационного периода, 3 — последствие фосфорных удобрений. Известно, что коэффициент использования фосфорных удобрений (КИУ) составляет в среднем 20% в год использования и 10% — во 2-й и 3-й год последствия. Третий подход, как правило, используют в исследованиях, посвященных расчетам баланса фосфора в почве. Данный подход в долгосрочной перспективе, например, при расчетах дозы удобрений за ротацию севооборота, позволяет обеспечивать планируемую урожайность культур севооборота при неизменных показателях плодородия почв.

В связи с этим цель работы — на основе обобщения результатов многолетних полевых опытов сравнить экономическую и экологическую обоснованность разных подходов к расчету доз фосфорных удобрений под зерновые культуры на черноземе выщелоченном в лесостепи Новосибирского Приобья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в многолетних опытах в “ОС Элитная” СФНЦА РАН в левобережной

части Новосибирского Приобья (54°53'13.5" с.ш. и 82°59'36.7" в.д.). По гидротермическим ресурсам район проведения исследования — Центральная лесостепь Новосибирского Приобья — характеризуется как достаточно, но неустойчиво увлажненная территория. Среднегодовое количество осадков составляет 452 мм, сумма температур воздуха $>10^{\circ}\text{C}$ — $\approx 1800^{\circ}\text{C}$. По погодным условиям годы исследования были разными, но в целом за 12 лет наблюдений условия вегетационного периода соответствовали среднемноголетним нормам.

Анализ данных урожайности и выноса фосфора растениями в среднем за 8 лет исследования (за 2010–2017 гг.) проведен в следующих опытах [14]: 1 — в 3-польном зернопаровом севообороте (пар—пшеница—пшеница, длительность опыта 18 лет), 2 — в 4-польном зернопаровом севообороте (пар—пшеница—пшеница—ячмень) и посевах бессеменной пшеницы в течение 23 лет, 3 — в 4-польном зернопаровом севообороте (пар—пшеница—пшеница—пшеница в течение 38 лет).

Почва — чернозем выщелоченный среднemosный среднегумусный среднесуглинистый (Luvic Chernozem). Агрохимическая характеристика почвы: гумус в Апах — 6.0%, содержание общего азота — 0.33%, подвижного P_2O_5 (по Чирикову) — 23, K_2O — 18 мг/100 г.

В опытах применяли общепринятую для лесостепной зоны интенсивную технологию возделывания зерновых культур. Выращивали яровую пшеницу сорта Новосибирская 31 и яровой ячмень сорта Ача. Обработка почвы — вспашка на глубину 25–27 см. Азотное удобрение (N_{aa}) вносили под предпосевную культивацию (КС 5.6 “Степняк”), фосфорное удобрение (АФ) — в паровое поле один раз за ротацию севооборота.

Урожайность зерновых культур определяли напрямую комбайном “Сампо-500”, солому измельчали и рассеивали по поверхности поля. Повторность в вариантах трехкратная. Статистическая обработка результатов выполнена методом

дисперсионного анализа с помощью пакета компьютерной программы “Снедекор” [15].

В почве содержание подвижного фосфора определяли по Чирикову (ГОСТ 26204-91) и по Карпинскому—Замятиной [16, 17], в растениях — вандомлибденовым методом по Пиневиц в модификации Куркаева [18]. Баланс фосфора в почве рассчитали как разность между суммами приходных и расходных статей его поступления по методике расчета хозяйственного баланса элементов питания [19]. Особенность предлагаемых в статье расчетов заключается в комплексном учете 4-х основных факторов: многолетние полевые опыты, на фонах исключено лимитирование культур по количеству азота, вынос элемента ранжировали по погодным условиям вегетационного периода, в опытах обеспечивали полную комплексную защиту растений от вредных организмов. Как было отмечено выше [10], ранее многие выводы об оптимальных дозах удобрений были сделаны без учета некоторых из этих факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на высокое содержание подвижного фосфора в почве, определенного по методу Чирикова, в опытах была получена высокая агрономическая эффективность внесения фосфорных удобрений. Прибавка урожайности пшеницы после пара возрастала по мере увеличения лет использования почвы в севооборотах с 0.31 до 1.10 т/га (табл. 1).

За годы исследования размах изменений величины урожайности пшеницы достигал 3.3 раза, что было связано с изменчивостью условий увлажнения вегетационного периода. Например, за 12 лет исследования в 2012 г. наблюдали очень сильную засуху ($\text{ГТК}_{\text{июня—июля}} < 0.3$), 5 лет из них были засушливыми ($\text{ГТК}_{\text{июня—июля}} 0.3–1.0$) и 6 лет — умеренно увлажненными ($\text{ГТК}_{\text{июня—июля}} > 1.0$), в зоне исследования встречаемость лет с такими условиями увлажнения составляет соответственно 8, 42 и 50% лет. В условиях очень сильной засухи урожайность была на 76%

Таблица 1. Агрономическая эффективность внесения фосфорных удобрений в посевах пшеницы после пара (среднее за 2006–2017 гг.), т/га

Севооборот (длительность опыта, лет)	Доза P_2O_5^*	Урожайность зерна, т/га			
		среднее	Lim	Прибавка	HCP_{05}
Пар—пшеница—пшеница (18)	P0	3.71	1.17–5.83	—	0.29
	P15	4.02	1.56–5.92	0.31	
Пар—пшеница—пшеница—ячмень (23)	P0	3.18	1.12–4.45	—	0.22
	P30	3.75	1.58–4.86	0.57	
Пар—пшеница—пшеница—пшеница (38)	P0	3.10	1.26–4.27	—	0.22
	P30	4.00	1.86–4.79	1.10	

* Доза P_2O_5 , кг/га севооборотной площади. То же в табл. 2.

Таблица 2. Урожайность пшеницы после пара в годы с различными условиями увлажнения вегетационного периода (2006–2017 гг.), т/га

Условия увлажнения	Севооборот (длительность опыта, лет)						HCP_{05}
	Пар—пшеница— пшеница (18)		Пар—пшеница— пшеница—ячмень (23)		Пар—пшеница— пшеница—пшеница (38)		
	P0	P15	P0	P30	P0	P30	
Очень сильная засуха	1.17	1.56	1.12	1.58	1.26	1.86	0.21
Засушливые	3.87	4.01	2.59	3.33	2.87	4.04	0.27
Умеренно увлажненные	3.99	4.44	4.02	4.46	3.59	4.31	0.29

Таблица 3. Влияние условий увлажнения вегетационного периода на урожайность зерновых культур (2006–2017 гг.), т з.е./га севооборотной площади

Условия увлажнения	Севооборот (длительность опыта, лет)					
	пар–пшеница–пшеница (18)		пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)		пар–пшеница–пшеница–пшеница (38)	
	N0P0	N40P15	N0P0	N40P30	N0P0	N40P30
Очень сильная засуха	0.69	0.93	0.76	1.06	0.57	0.84
Засушливые	2.22	2.52	1.60	2.41	1.67	2.76
Умеренно увлажненные	2.49	2.82	2.45	3.09	1.94	2.93

Таблица 4. Средняя урожайность в опыте (2006–2017 гг.)

Севооборот (длительность опыта, лет)	Доза удобрений*	Урожайность зерна, т/га	
		среднее	Прибавка
Пар–пшеница–пшеница (18)	N0P0	2.23	–
	N40P15	2.54	0.31
Пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)	N0P0	1.96	–
	N40P30	2.64	0.68
Пар–пшеница–пшеница–пшеница (38)	N0P0	1.71	–
	N40P30	2.68	0.97

* Доза д.в. удобрений, кг/га севооборотной площади. То же в табл. 5.

меньше, в засушливых – на 27% меньше, чем в умеренно увлажненные годы (табл. 2).

Из этих данных следует, что в настоящее время в отсутствие надежного прогноза погоды вегетационного периода фактически невозможно рассчитать планируемую урожайность для отдельно взятого года. Поэтому расчет данной величины вынуждены вести в зависимости от среднесуточных показателей увлажнения. Фактическим результатом расчетов является определение климатически обеспеченной урожайности культуры по имеющимся ресурсам влаги. И, следовательно, вполне логичным является расчет дозы фосфорных удобрений для климатически обеспеченной урожайности культур в севообороте в целом, используя как базовый показатель величину среднего отчуждения фосфора урожаем основной продукции культур севооборота. При этом расчет дозы удобрений должен обеспечивать восполнение отчуждения фосфора урожаем (хозяйственный вынос) в целом без учета действия и последствия фосфорных удобрений. Основанием этого является мнение исследователей, что действие фосфорных удобрений

в многолетнем цикле может достигать 100% при условии, что технология возделывания сельскохозяйственных культур исключает потери фосфора из почвы.

В нашем исследовании получены экспериментальные данные зависимости урожайности зерновых культур в севообороте от условий увлажнения вегетационного периода. Например, при очень сильной засухе урожайность была в 3.3 раза меньше, чем в умеренно увлажненные годы. Внесение азотно-фосфорных удобрений в среднем повышало урожайность культур в 1.3 раза (табл. 3).

В среднем за годы исследования урожайность зерновых культур в вариантах без внесения удобрений составляла ≈2 т/га севооборотной площади, при систематическом внесении азотно-фосфорных удобрений прибавка урожая составляла 0.31–0.97 т/га (табл. 4). Увеличение дозы фосфорных удобрений с P15 до P30 не способствовало дальнейшему повышению урожайности.

Проведенное исследование позволило оценить баланс фосфора в почве в изученных севооборотах. В зависимости от условий увлажнения отчуждение

Таблица 5. Влияние условий увлажнения вегетационного периода зерновых культур на отчуждение фосфора и его баланс в почве (2006–2017 гг.), кг/га севооборотной площади

Условия увлажнения	Севооборот (длительность опыта, лет)					
	Пар—пшеница—пшеница (18)		Пар—пшеница—пшеница—ячмень (23)		Пар—пшеница—пшеница (38)	
	N0P0	N40P15	N0P0	N40P30	N0P0	N40P30
Отчуждение P_2O_5 урожаем зерна						
Очень сильная засуха	6.9	9.4	7.4	11.2	5.7	8.5
Засушливые	24.7	28.1	17.0	25.5	18.7	30.6
Умеренно увлажненные	26.3	29.6	25.6	32.4	20.7	31.2
Баланс P_2O_5 в почве						
Очень сильная засуха	–6.9	5.6	–5.7	21.5	–7.4	18.8
Засушливые	–24.7	–13.1	–18.7	–0.6	–17.0	4.5
Умеренно увлажненные	–26.3	–14.6	–20.7	–1.2	–25.6	–2.4

Таблица 6. Среднегодовые величины выноса фосфора зерновыми культурами на 1 га севооборотной площади и баланс его в почве (2006–2017 гг.), кг/га

Севооборот (длительность опыта, лет)	Доза удобрений	Вынос P_2O_5 , кг/га		Баланс фосфора в почве
		зерном (отчуждение)	надземной биомассой	
Пар—пшеница—пшеница (18)	N0P0	24	39	–22
	N40P15	27	45	–11
Пар—пшеница—пшеница—ячмень (23)	N0P0	19	31	–17
	N40P30	28	45	4
Пар—пшеница—пшеница—пшеница (38)	N0P0	17	28	–16
	N40P30	29	47	3

фосфора из почвы составляло в очень засушливые годы в контроле 6–7 кг/га, при внесении азотно-фосфорных удобрений – 11 кг/га, в умеренно увлажненные годы – 26 и 32 кг/га соответственно (табл. 5).

В среднем за год вынос фосфора урожаем зерна (отчуждение элемента) составлял в контрольных вариантах ≈ 20 кг P_2O_5 /га севооборотной площади, в вариантах с внесением удобрений достигал 29 кг/га. Вынос его надземной биомассой был в 1.6 раза больше и достигал 47 кг/га (табл. 6).

Баланс фосфора в почве в вариантах без внесения фосфорных удобрений был дефицитным (–16...–22 кг/га), при внесении P15 дефицит его составлял –11 кг/га, при дозе P30 сальдо баланса было положительным, т.е. поступление фосфора было избыточным. Свидетельством избыточности доз фосфорных удобрений >P30 для зерновых агроценозов в лесостепи Приобья были 2 показателя. Во-первых, многолетнее ежегодное применение (17–36 лет) привело к накоплению в почве легкоподвижного минерального фосфора (табл. 7).

Во-вторых, при дозах >P30 обнаружено накопление ферментативно доступной фракции органических соединений фосфора [20]. Известно, что избыток подвижного фосфора в пахотном слое почвы

всегда создает условия для потерь элемента из агроценоза и, как следствие, может привести к загрязнению окружающей среды.

Анализ экономической эффективности применения минеральных удобрений в севооборотах показал, что при внесении фосфорных удобрений в запас прибавка урожая зерна 1-й пшеницы после пара (1-й год действия удобрений) не окупает дополнительных затрат на их внесение. Прибыль от внесения минеральных удобрений была получена в опытах со 2-й и 3-й культурой севооборота после пара, где проявлялось действие азотного и последствие фосфорного удобрения (табл. 8). В среднем в севообороте чистая прибыль при внесении азотного (N40) и фосфорного удобрения (P15) была больше, чем при внесении P30.

Таким образом, расчет дозы фосфорных удобрений с учетом повышения запасов подвижного элемента в почве является высокочувствительным. Подобный подход уже был опробован в нашей стране [10]. Известно, что массовые мероприятия химизации земледелия в СССР не дали ожидаемых результатов. Например с 1970 по 1985 г., когда поставки минеральных удобрений возросли с 4 до 10 млн т/год, обеспеченность пашни удобрениями приблизилась к 100 кг д.в./га, но урожайность оставалась на уровне 13 ц/га. В последующие годы

Таблица 7. Влияние доз удобрений на содержание легкоподвижного фосфора в почве в заключительном поле севооборота (2017 г.), мг/кг

Севооборот (длительность опыта, лет)	Доза удобрений	Содержание легкоподвижного фосфора в почве (по Карпинскому), мг/кг
Пар–пшеница–пшеница (18)	N0P0	0.21
	N40P15	0.58 (среднее)
Пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)	N0P0	0.37
	N40P30	1.89 (высокое)
Пар–пшеница–пшеница–пшеница (38)	N0P0	0.37
	N40P30	0.83 (повышенное)

Таблица 8. Экономическая эффективность технологии возделывания зерновых культур в севообороте и внесения минеральных удобрений (2006–2017 гг.)

Севооборот (длительность опыта, лет)	Доза удобрений	Стоимость продукции, руб./га	Производственные затраты, руб./га		Чистая прибыль, руб./га	Прибыль от удобрений, руб./га
			удобрения	всего		
1-я пшеница после пара (действие фосфорных удобрений)						
Пар—пшеница—пшеница (18)	P0	44 520	0	12 965	31 555	—965
	P15	48 240	4685	17 650	30 590	
Пар—пшеница—пшеница—яч- мень (23)	P0	38 160	0	12 965	25 195	—5056
	P30	45 000	11 896	24 862	20 138	
Пар—пшеница—пшеница— пшеница (38)	P0	37 153	0	12 965	24 187	—1049
	P30	48 000	11 896	24 862	23 138	
2-я пшеница после пара (действие азотных, последствие фосфорных удобрений)						
Пар—пшеница—пшеница (18)	N0P0	35 657	0	10 273	25 384	1681
	N40P15	43 054	5716	15 988	27 065	
Пар—пшеница—пшеница— ячмень (23)	N0P0	25 737	0	10 273	15 464	5741
	N40P30	35 397	3919	14 192	21 205	
Пар—пшеница—пшеница— пшеница (38)	N0P0	24 935	0	10 273	14 662	14 133
	N40P30	42 988	3919	14 192	28 796	
3-я пшеница (ячмень) после пара						
Пар—пшеница—пшеница— ячмень (23)	N0P0	22 493	0	10 273	12 220	8226
	N40P30	34 638	3919	14 192	20 446	
Пар—пшеница—пшеница— пшеница (38)	N0P0	20 230	0	10 273	9957	13 631
	N40P30	37 780	3919	14 192	23 588	
Среднее за ротацию севооборота (на 1 га севооборотной площади)						
Пар—пшеница—пшеница (18)	N0P0	26 726	0	7746	18 980	239
	N40P15	30 431	3467	11 213	19 218	
Пар—пшеница—пшеница— ячмень (23)	N0P0	23 472	0	8378	15 094	3240
	N40P30	31 645	4934	13 311	18 334	
Пар—пшеница—пшеница— пшеница (38)	N0P0	20 579	0	8378	12 202	6679
	N40P30	32 192	4934	13 311	18 880	

Примечания. 1. Стоимость удобрений в ценах 2023 г.: АФ – 50 000, N_{аа} – 15 000 руб./т. 2. Цена зерна яровой пшеницы – 12 000, ячменя – 9000 руб./т.

(2011–2015 гг.) при сокращении их внесения до 39 кг д.в./га урожайность возросла до 22 ц/га. Не учитывая данный негативный опыт, многие исследователи утверждают, что планы увеличения объема производства зерна в РФ до 145–150 млн т к 2030 г. можно осуществить только при систематическом повышении плодородия почв за счет комплексного агрохимического окультуривания полей (КАХОП), путем внесения ежегодно не менее 7.4 млн т д.в. минеральных удобрений [21]. Такой подход приводит к тому, что агрохимические показатели почвы повышаются, а урожайность не растет. При этом низкая окупаемость удобрений (среднемировая окупаемость 1 кг д.в. удобрений зерном составляет ≈10 кг, что в 2 раза больше, чем в РФ) означает не только упущенную выгоду, но и экологический ущерб [10].

Как показали наши данные, расчет доз удобрений на основе величины выноса элемента из почвы (зерно + солома) также не всегда оправдан с экономических и экологических позиций. Установлено, что по крайней мере в черноземах Западной Сибири возмещение отчуждения фосфора зерном в многолетнем цикле не только достаточно для обеспечения климатически обеспеченной урожайности яровой пшеницы, но и предотвращает формирование подвижного пула фосфора — потенциального источника загрязнения окружающей среды.

Вывод об избыточности доз фосфора, превышающих отчуждение его из почвы (отчуждение только зерном), не противоречит результатам других исследователей. В частности, в многолетних опытах на черноземах Курганской обл. при дозах P15–20 изменение обеспеченности почвы подвижным фосфором не было обнаружено, но урожайность культур достоверно повышалась по сравнению с контролем, тогда как увеличение дозы до P60 привело к повышению обеспеченности почвы фосфором с низкого до высокого, но прибавки урожая относительно фона P15–20 не было отмечено [22, 23]. Сходные результаты получили на черноземах Омской обл. Было установлено, что внесенный с удобрением фосфор остается в наиболее подвижных (1-й и 2-й) фракциях минеральных фосфатов почвы, что и обеспечивает длительное последствие фосфорных удобрений. При этом улучшение условий фосфорного питания растений не сопровождалось повышением содержания подвижного фосфора в почве [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для условий Приобья расчет доз фосфорных удобрений на основе величины отчуждения фосфора урожаем зерна является более обоснованным с экономических и экологических позиций в сравнении с расчетом на основе величины выноса элемента всей надземной биомассой растений. То есть в интенсивных технологиях возделывания зерновых культур доза фосфорного удобрения при

систематическом его применении должна соответствовать отчуждению элемента только зерном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Van Vuuren D.P., Bouwman A.F., Beusen A.H.* Phosphorus demand for the 1970–2100 period: a scenario analysis of resource depletion // *Global Environ. Change*. 2010. V. 20(3). P. 428–439. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.04.004>
2. *Yu X., Keitel C., Dijkstra F.A.* Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops // *Global Food Secur.* 2021. V. 29. 100545. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100545>
3. *Gu Yu., Ros G.H., Zhu Q., Zheng D., Shen J., Cai Z., Xu M., de Vries W.* Responses of total, reactive and dissolved phosphorus pools and crop yields to long-term fertilization // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2023. V. 357. 108658. DOI:10.1016/j.agee.2023.108658
4. *Li B., Ng S.J., Han J.-C., Li M., Zeng J., Guo D., Zhou Y., He Z., Wu X., Huang Y.* Network evolution and risk assessment of the global phosphorus trade // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 860. № 20. 160433. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160433>
5. *Tilman D., Balzer C., Hill J., Befort B.L.* Global food demand and the sustainable intensification of agriculture // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 2011. V. 08(50). P. 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
6. *Jagdeep-Singh, Gobinder-Singh, Gupta N.* Balancing phosphorus fertilization for sustainable maize yield and soil test phosphorus management: A long-term study using machine learning // *Field Crops Res.* 2023. V. 304. 109169. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109169>
7. *Hu W., Li C.-H., Ye C., Wang J., Wei W.-W., Deng Y.* Research progress on ecological models in the field of water eutrophication: CiteSpace analysis based on data from the ISI web of science database // *Ecol. Model.* 2019. V. 410. 108779. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108779>
8. *Сычев В.Г.* Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования. М.: РАН, 2019. 328 с.
9. *Муравин Э.А.* Агрохимия: учебник и учеб. пособ для студ сред. учеб. завед. М.: КолосС, 2004. 384 с.
10. *Кирюшин В.И.* Минеральные удобрения как ключевой фактор развития сельского хозяйства и оптимизации природопользования // *Достиж. науки и техн. АПК*. 2016. Т. 30. № 3. С. 19–25.
11. *Смирнов П.М., Муравин Э.А.* Агрохимия: учеб-к для вузов. М.: Колос, 1977. 240 с.
12. *Каренгина Л.Б., Байкенова Ю.Г.* К методике расчета комплексного агрохимического окультуривания полей // *Аграрн. вестн. Урала*. 2016. № 8(150). С. 31–37.

13. Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 3–13.
14. Реестр длительных стационарных полевых опытов ГНУ СО Россельхозакадемии. Новосибирск: ИИЦ ЦНСХБСО РАСХН, 2009. 287 с.
15. Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере. Новосибирск: СО РАСХН, 2008. 217 с.
16. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
17. Берхин Ю.И., Чагина Е.Г. Одновременное определение азота нитратов и фосфора в солевой (0.03 н. K_2SO_4) вытяжке // *Агрохимия*. 1983. № 1. С. 119–121
18. Куркаев В.Т. Ускоренное определение азота, фосфора и калия в растениях из одной навески // *Почвоведение*. 1959. № 9. С. 114–117.
19. Методика расчета баланса элементов питания в земледелии Республики Беларусь. Минск: БНИВНФХ в АПК, 2007. 24 с.
20. Данилова А.А. Оптимальные дозы фосфорных удобрений (к почвенно-биохимическим аспектам проблемы) // *Сибир. вестн. с.-х. науки*. 2019. № 49(3). С. 5–15.
<https://doi.org/10.26898/0370-8799-2019-3-1>
21. О ходе приобретения минеральных удобрений в 2020 г. и планы по приобретению до 2025 г. М.: / Минсельхоз РФ, 2020. [Электр. ресурс]. URL: <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/4a5/4a5e8900ca37701862e106b46d2f0abe.pdf> (дата обращения: 10.07.2023).
22. Волынкин В.И., Копылов А.Н., Волынкина О.В. Влияние минеральных удобрений на урожайность культур и агрохимические свойства выщелоченного чернозема // *Плодородие*. 2014. № 6. С. 14–16.
23. Волынкина О.В., Волынкин В.И., Кириллова Е.В., Копылов А.Н. Системы удобрения в агротехнологиях Зауралья. Куртамыш: ООО “Куртамышская типография”, 2017. 284 с.
24. Храпцов И.Ф. Агрохимические аспекты управления плодородием черноземных почв равнинных ландшафтов Западной Сибири // *Агрохимические свойства почвы и приемы их регулирования: Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. IV Сибирских агрохимических Прянишниковских чтений (Иркутск, 16–21 июля 2007 г.)*. Новосибирск: РАСХН, СО, 2009. С. 23–33.

Optimal Dose of Phosphorus Fertilizers for Grain Agroecosystems in Ob Region

S. A. Kolbin^a, A. A. Danilova^{a, #}, A. G. Rakhlenko^a

^aSiberian Federal Scientific Centre of Agrobiotechnologies of the RAS,
ul. Centralnaya 26, Novosibirsk district, Krasnoobsk 630501, Russia

[#]E-mail: Danilova7alb@yandex.ru

The need to intensify the agricultural sector to ensure the food security of the growing population of the planet against the background of depletion of natural sources of phosphorous raw materials leads to an increase in the costs of agricultural producers for phosphorus fertilizers (PF), which increases the urgency of the problem of optimizing the doses of the latter. Based on the generalization of the results of long-term field experiments, the economic and environmental validity of different approaches to calculating doses of PF for cereals in the Ob region was compared. The study was conducted in 2006–2017 in long-term experiments of the SFNCA RAS on leached medium loamy medium humus chernozem in the Central forest steppe of the Ob region (54°53'13.5" n.w., 82°59'36.7" e.l.). Calculations were performed based on the results of observations in 3 crop rotations: 3-field grain-fallow (fallow–wheat–wheat), in 4-field grain-fallow (fallow–wheat–wheat–barley), in 4-field grain-fallow (fallow–wheat–wheat–wheat). The duration of the experiments was 18, 23, 38 years, respectively. The experiments were carried out against the background of nitrogen fertilizers with a complete scheme of plant protection from harmful organisms. A high agronomic efficiency of PF application has been established: the increase in grain yield with the use of P15–P30 averaged 0.5–1.2 t/ha. Phosphorus removal by the grain harvest (its alienation from the field) in the control variants was ≈ 20 kg P_2O_5 /ha of the crop area, in the variants with fertilization it reached 30 kg/ha. Its removal by aboveground biomass was 1.6 times greater and reached 48 kg/ha. The phosphorus balance in the soil in the variants of experiments without the introduction of PF was deficient (–15...–27 kg/ha), with the introduction of P15 its deficit was –11 kg/ha, with a dose of P30 the balance was positive, i.e. the phosphorus intake was excessive. Two indicators were considered as evidence of excess doses of PF > P30 for grain agroecosystems in the forest steppe of the Ob region: accumulation of mobile mineral phosphorus in the soil and an increase in the fraction of enzymatically available phosphorus, these pools can become a source of phosphorus losses from agroecosystem. It is concluded that for the leached chernozem of the Ob region, the calculation of doses of phosphorus fertilizers based on the amount of phosphorus alienation by the grain harvest is more justified from an economic and environmental point of view in comparison with the calculation based on the amount of removal of the element by the entire aboveground (grain + straw) biomass of plants.

Keywords: phosphorus fertilizers, agroecosystem, crop rotation, crops, phosphorus alienation by grain harvest, phosphorus removal by aboveground biomass, phosphorus balance in soil.