

УДК 631.85:631.421.1

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ДЛИТЕЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ОПЫТАХ РОССИИ, ВЕЛИКОБРИТАНИИ И КИТАЕ<sup>1</sup>

© 2024 г. А. Н. Налиухин<sup>1,\*</sup>, Н. А. Кирпичников<sup>2</sup>, С. П. Бижан<sup>2</sup>, Ю. Е. Гусева<sup>1</sup><sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева  
127434 Москва, ул. Прянишникова, 6, Россия<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова  
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

\*E-mail: naliuhin@yandex.ru

Представлены результаты исследований в длительных полевых опытах по изучению эффективности фосфорных удобрений. Все эксперименты были заложены по классической схеме и включали в себя помимо контрольного варианта (без удобрений) азотно-калийный фон, на котором изучали эффективность фосфорных удобрений. При этом в каждом опыте учитывали региональную специфику: известкование – на опытной станции Всероссийского НИИ агрохимии (Россия), эффективность фосфорных удобрений при возрастающих дозах азота N100–300 – на Ротамстедской опытной станции (Великобритания), сочетание фосфорных удобрений с навозом на Китайской национальной базе мониторинга плодородия почв. В длительных опытах представлена динамика изменения содержания подвижного фосфора, а также отдельных фракций с учетом складывающегося баланса  $P_2O_5$ . Показано, что перераспределение фосфора между различными фракциями почв носит обратимый характер, а направленность процессов зависит от складывающегося баланса  $P_2O_5$ . Фосфор, накопленный в более прочно удерживаемых формах, впоследствии может высвободиться и поглощаться выращиваемыми сельскохозяйственными культурами. Во всех полевых опытах наблюдали увеличение разрыва в урожайности между вариантами NK и NK + P с течением времени. С одной стороны, это обусловлено значительным уменьшением содержания фосфора в фоновом варианте NK (в кислых почвах – еще и увеличением подвижности Al), в котором вынос фосфора значительно превосходит контроль (без удобрений), с другой – существенным повышением содержания  $P_2O_5$  в почве при положительном балансе. В длительном эксперименте на опытной станции ВНИИ агрохимии разностный коэффициент использования фосфора из удобрений составил 25–27, Ротамстедской станции – 25–41, Китайской национальной базы мониторинга плодородия почв – 45%. Обращает на себя внимание высокая окупаемость фосфорных удобрений в опытах на Ротамстедской опытной станции (Великобритания) – 22–39 кг зерна/кг  $P_2O_5$  (при возделывании озимой пшеницы в севообороте). Главным приемом повышения окупаемости в этом случае было применение высоких доз азота – до 200 кг N/га. Исследования показали, что существенными приемами повышения эффективности фосфорных удобрений является известкование кислых почв до слабокислой реакции, использование цинковых микроудобрений, а также фосфатмобилизирующих микроорганизмов.

**Ключевые слова:** фосфорные удобрения, длительный полевой опыт, фосфатный режим почв, баланс фосфора, урожайность.

**DOI:** 10.31857/S0002188124120128, **EDN:** VUJQJX

### ВВЕДЕНИЕ

Фосфор, наряду с азотом и калием, считается наиболее важным питательным элементом для роста и развития растений, определяющим величину и качество урожая сельскохозяйственных культур.

<sup>1</sup>Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

В вегетирующих растениях большая часть фосфора сосредоточена в молодых тканях и органах, а по мере созревания наибольшее его количество накапливается в товарной части урожая. Фосфор входит в состав органических соединений: нуклеиновых кислот, АТФ, многочисленных фосфорных эфиров углеводов, липидов, липопротеидов, фитина и других. Небольшая его часть содержится в минеральной форме. В целом, фосфор играет ключевую роль в передаче

наследственной информации, метаболизме, структуре и преобразовании энергии в растениях [1].

Проблемы оптимизации фосфатного режима и физико-химических свойств почв являются ключевыми не только для земледелия России, но и всех стран мира. Суммарные разведанные запасы фосфатного сырья в России на сегодняшний день составляют 1 млрд 213 млн т  $P_2O_5$ , что с учетом добычи фосфатов на уровне 13–14 млн т/год хватит на 89 лет [2]. В среднем в мире при сохраняющихся объемах добычи фосфатных руд разведанных запасов хватит на 320-летний период [3].

Ввиду низких коэффициентов использования фосфора из удобрений, их высокой стоимости, а также ограниченности запасов фосфатных руд, необходимо увеличивать эффективность фосфорных удобрений, которая зависит от почвенно-климатических условий, свойств удобрений, биологических особенностей сельскохозяйственных культур.

Фосфорные удобрения обладают длительным последействием, особенно при внесении в дозах, превышающих вынос  $P_2O_5$  урожаем. Именно поэтому изменение эффективности удобрений со временем можно выявить только в длительных стационарных полевых опытах [4]. Несомненным представляется интерес сравнение эффективности фосфорных удобрений в различных странах мира, изучение современных подходов к оценке фосфатного режима почв.

Именно поэтому в настоящем обзоре рассмотрены 4 длительных эксперимента, заложенных в России (опытная станция ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова), Великобритании (Ротамстедская опытная станция) и Китае (Национальный центр мониторинга плодородия почв и эффективности удобрений черноземных почв (Black Soil)). Следует отметить, что все рассмотренные опыты имеют контроль (без удобрений) и азотно-калийный фон, что особенно важно для оценки эффективности фосфорных удобрений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ В ДЛИТЕЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ОПЫТАХ

*Российская Федерация.* Несмотря на большой объем выпускаемых фосфорных удобрений (4.4 млн т  $P_2O_5$  в 2022 г.), в России под сельскохозяйственные культуры ежегодно вносят порядка 0.8 млн т  $P_2O_5$ , что составляет всего 18% от производства [5]. За последние 30 лет (1991–2020 гг.) превышение выноса фосфора урожаем над поступлением с удобрением составило 14 млн т д.в. или 6 кг  $P_2O_5$ /га пашни. Возмещение выноса составляет всего 65%. При ежегодном отрицательном балансе фосфора отмечена тенденция к увеличению доли низкообеспеченных

фосфором почв. Только в Нечерноземной зоне площади с низким содержанием подвижного фосфора возросли на 30% [6, 7].

С учетом планируемого дальнейшего роста урожайности сельскохозяйственных культур вынос фосфора будет увеличиваться с 10–12 до 20–22 кг/га пашни, что с учетом научно обоснованной потребности в компенсации выноса  $P_2O_5$  на 100% и площади пашни 85.0 млн га потребует ежегодного внесения 1.7–1.9 млн т  $P_2O_5$ . Таким образом, 40% производимых в России фосфорных удобрений должно быть использовано на внутреннем рынке.

Ввиду того, что 1/3 пахотных почв России имеет кислую реакцию среды, неблагоприятную для возделывания сельскохозяйственных культур, и низкую обеспеченность подвижным фосфором, исследования ученых-агрохимиков были сосредоточены на изучении возможности сочетания известкования с применением фосфорных удобрений.

В длительном полевом опыте Центральной опытной станции ВНИИ агрохимии (год закладки – 1966 г.) изучили влияние фосфорных удобрений и периодического известкования разными дозами  $CaCO_3$  на урожайность зерновых культур и фосфатный режим слабоокультуренной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы (подстилаящая порода – покровная глина). Исходные агрохимические показатели были следующими:  $pH_{KCl}$  4.0 ед.,  $H_r$  – 4.4 мг-экв/100 г, сумма оснований – 7.5–8.2 мг-экв/100 г, содержание подвижных форм  $P_2O_5$  и  $K_2O$  (по Кирсанову) – 39–42 и 110–115 мг/кг соответственно, гумуса – 1.64–1.67% [8].

В 1-й и 2-й ротациях севооборот был следующим: вико-овсяная смесь – озимая пшеница с подсевом клевера – клевер 1-го года пользования – картофель – ячмень. С 3-й и до 6-й ротации севооборот был следующим: озимая пшеница – картофель – ячмень + клевер, – клевер 2-х лет пользования. В 6-й ротации картофель был исключен из севооборота. В настоящее время (с 12-й ротации) ведется следующий севооборот: озимая пшеница – ячмень – горох. Схема опыта включала следующие варианты: 1 – контроль (без удобрений), 2 – NK – фон, 3 – NK + АФ, 4 – NK + известь 1.5 г.к., 5 – NK + известь 1.5 г.к. + АФ, 6 – NK + известь 2.5 г.к. (в 1-, 3- и в 8-й ротациях), 7 – NK + известь 2.5 г.к. + АФ [9].

В опыте применяли аммиачную селитру ( $N_{aa}$ ), аммофос (АФ), хлористый калий ( $K_x$ ). Под озимую пшеницу вносили  $N120P60K90$ , ячмень –  $N90P60K90$  под предпосевную культивацию, под озимую пшеницу –  $N60$ –90 весной в подкормку. Опыт заложен на двух полях, размеры делянок  $16.5 \times 6 = 100 \text{ м}^2$ . Учет урожайности проводили сплошным методом. Почвенные образцы отбирали осенью после уборки урожая. В опыте возделывали озимую пшеницу сорта Московская 56, яровой ячмень сорта Владимир.

За 55-летний период ежегодное одностороннее применение азотно-калийных удобрений, несмотря на смену сортов на более интенсивные, не обеспечило последовательный рост их урожайности (рис. 1).

Наоборот, в 10–13-й ротациях наметилась тенденция к снижению продуктивности зерновых культур вследствие подкисления почвы физиологически кислыми азотными и калийными удобрениями, а также из-за значительного возрастания содержания подвижного алюминия  $>120$  мг/кг почвы. Внесение фосфорных удобрений на азотно-калийном фоне способствовало стабилизации урожайности в последние годы на уровне 38–39 ц зерна/га. При внесении извести в дозе по 1.5 и 2.5  $H_T$  прибавка от фосфорных удобрений увеличивалась на 11 и 20 ц/га или на 29–53%.

По данным работы [10], применение цинковых микроудобрений повышало эффективность фосфорных удобрений, обеспечивая дополнительную прибавку урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя в зависимости от кислотности почвы на 2.0–5.4 ц/га или 10–14%. Наибольшая окупаемость 1 кг  $P_2O_5$  прибавкой урожайности зерна (12.4–14.6 кг) достигалась при слабокислой реакции почвенной среды ( $pH_{KCl}$  5.4 ед.) с совместным внесением аммофоса (N14P60) и сернокислого цинка (5 кг  $ZnO$ /га) на фоне N106K90.

Известкование, значительно снижая кислотность почвы, способствует существенному уменьшению содержания подвижного алюминия. Отмечена тесная взаимосвязь содержания  $Al$  с величиной обменной кислотности. Наши расчеты показали, что

уменьшение  $H_{обм}$  на 0.1 ммоль приводит к снижению содержания подвижного алюминия на 9 мг/кг почвы (рис. 2а).

Именно поэтому при оценке парных коэффициентов корреляции наиболее сильная взаимосвязь урожайности сельскохозяйственных культур (озимой пшеницы и ярового ячменя) была обусловлена обменной и гидролитической кислотностью (табл. 1, рис. 2б). Например, с возрастанием показателя  $H_T$  на 1 ммоль урожайность зерновых культур снижалась на 4.9 ц/га.

Известкование способствовало повышению степени подвижности фосфатов — отношению  $P_2O_5$  в вытяжке по Кирсанову к концентрации  $P_2O_5$  в  $CaCl_2$ -вытяжке. Например, этот показатель при внесении 1200 кг  $P_2O_5$ /га в варианте без извести составлял  $\approx 60$ , с известью — 48, т.е. темпы накопления легкоподвижных фосфатов в известкованной почве шли более интенсивно по сравнению с неизвесткованной [11].

В кислых почвах при высоком содержании подвижного алюминия для уменьшения его токсичности требуется более высокое содержание  $P_2O_5$ . При взаимодействии  $P_2O_5$  с алюминием образуются малорастворимые фосфаты, что значительно снижает его подвижность и токсичность для растений, что также подтверждается ростом урожайности зерновых культур при внесении АФ на фоне НК на неизвесткованном фоне (рис. 1). Именно поэтому оптимальный уровень содержания подвижного фосфора

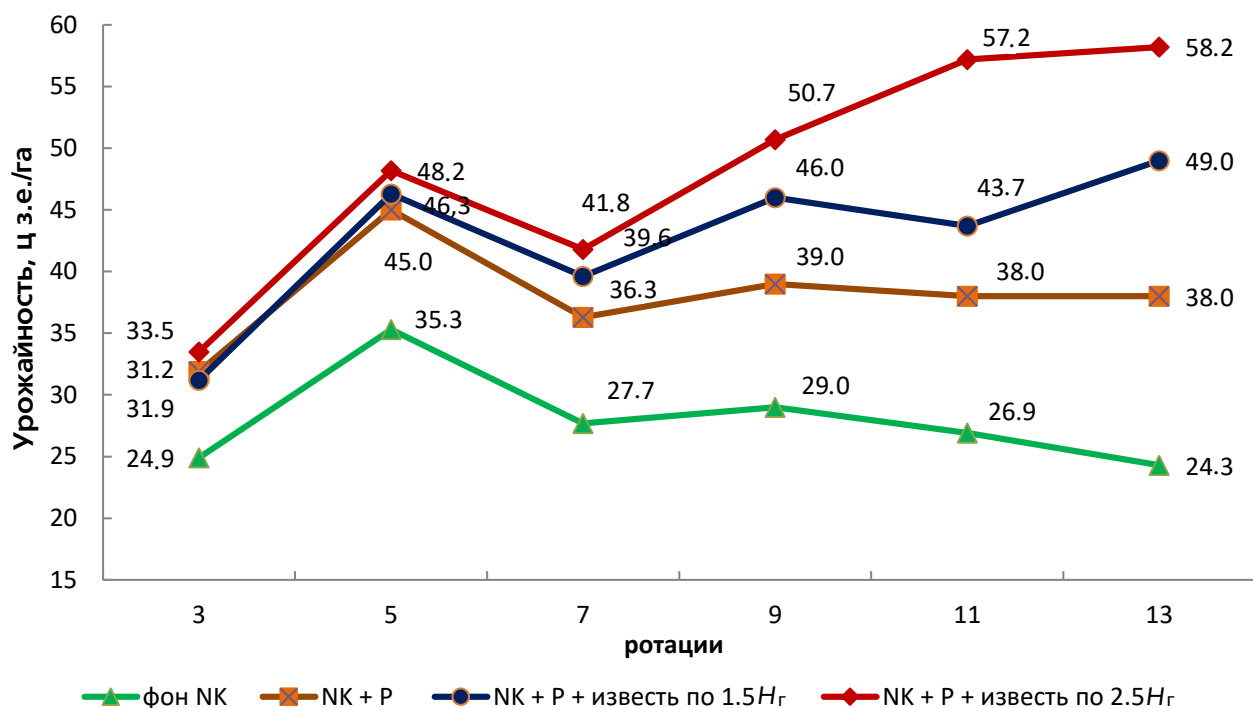


Рис. 1. Влияние фосфорных удобрений и периодического известкования разными дозами  $CaCO_3$  дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы на урожайность зерновых культур в ротациях севооборота, ц з.е./га.

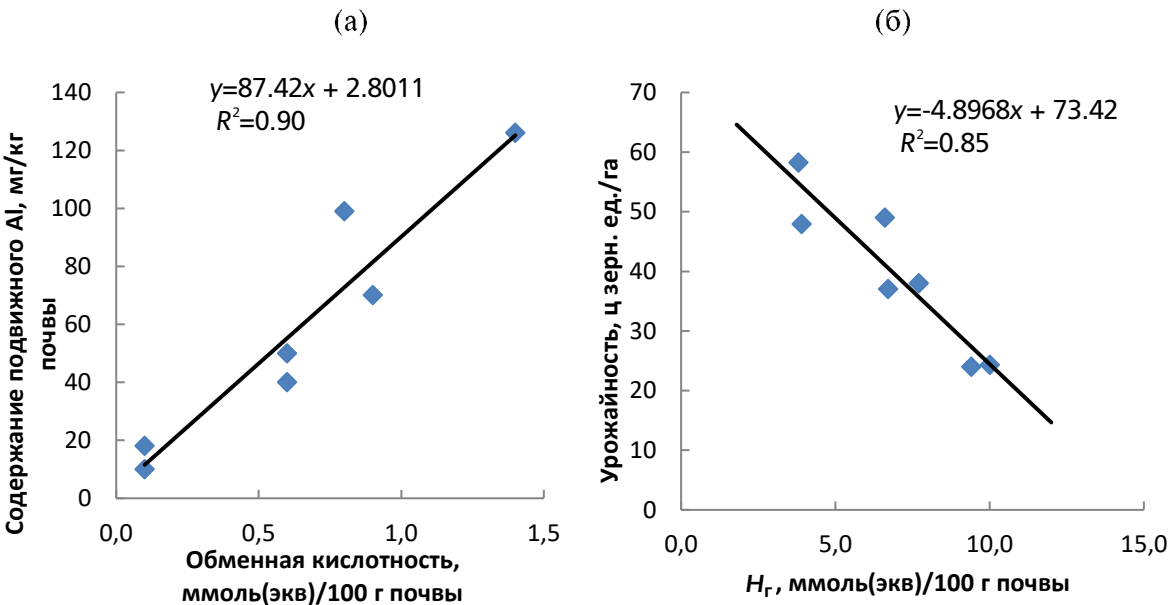


Рис. 2. Зависимость содержания подвижного алюминия в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве от величины обменной кислотности (а), урожайности культур от величины гидролитической кислотности (б).

Таблица 1. Парные коэффициенты корреляции между различными агрохимическими показателями дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы и урожайностью сельскохозяйственных культур

Показатель	Урожай-ность	pH <sub>KCl</sub>	H <sub>обм</sub>	H <sub>г</sub>	S	V	Al <sub>подв</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (по Кирсанову)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (по Скофилду)
Урожайность	1.00								
pH <sub>KCl</sub>	0.86	1.00							
H <sub>обм</sub>	−0.87	−0.91	1.00						
H <sub>г</sub>	−0.92	−0.94	0.97	1.00					
S	0.87	0.99	−0.91	−0.92	1.00				
V	0.88	0.98	−0.96	−0.97	0.98	1.00			
Al <sub>подв</sub>	−0.82	−0.87	0.95	0.89	−0.89	−0.93	1.00		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (по Кирсанову)	0.58	0.21	−0.24	−0.26	0.25	0.19	−0.16	1.00	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (по Скофилду)	0.40	0.22	−0.40	−0.30	0.26	0.26	−0.23	0.71	1.00

в зависимости от кислотности почвы может существенно повышаться.

В этом отношении весьма точно высказывание Н.А. Кирпичникова [11] о том, что «... Действие извести, как и фосфорных удобрений, направлено в сторону улучшения обеспеченности растений фосфором. За счет использования этих двух факторов можно регулировать оптимальное питание растений фосфором», ... т.е. отмечен сопряженный эффект взаимодействия фосфорных и известковых удобрений – внесение одних удобрений снижает потребность в других.

В рассмотренном опыте при ежегодном внесении Р60 на азотно-калийном фоне при известковании СаСО<sub>3</sub> в дозе по 2.5 H<sub>г</sub> складывался слабopоложительный баланс фосфора. Урожайность зерновых культур 60 ц/га достигалась при содержании подвижного фосфора на уровне 100 мг/кг почвы (по Кирсанову) и степени его подвижности 0.11–0.15 мг/л (по Скофилду). Коэффициент использования фосфора за 10-летний период (2018–2023 гг.) составил 27%. Следует отметить, что такое содержание подвижного фосфора находится на верхней границе средней–нижней границе повышенной обеспеченности (3–4-я группы). На наш взгляд, содержание подвижного фосфора

100–125 мг/кг для кислых дерново-подзолистых почв Нечерноземья при возделывании зерновых можно считать оптимальным как с агрономической, так и с экономической точки зрения [9, 10].

Конечно, оптимальный фосфатный режим дерново-подзолистых почв зависит не только от содержания подвижного фосфора, а также других его форм, но и от таких факторов, как величина почвенной кислотности, содержание гумуса, емкость поглощения, степень насыщенности основаниями, гранулометрический состав. Эти факторы в значительной степени влияют на питание растений фосфором, поэтому для каждой культуры существует свой оптимальный уровень содержания фосфора в почве, который связан с взаимным влиянием ее свойств [12–15].

По данным [16], урожайность зерновых культур 35–50 ц/га достигается при содержании 100–120 мг  $P_2O_5$ /кг почвы, картофеля – порядка 120–150 мг  $P_2O_5$ /кг почвы. Поэтому оптимальным следует считать такой уровень содержания подвижного фосфора в почве, при котором достигается не менее 90–95% от максимальной урожайности, а недостающие 5–10% компенсируются за счет внесения фосфорных удобрений, обеспечивающих возмещение выноса  $P_2O_5$  урожаем.

В длительном стационарном опыте ВНИИ льна максимальная урожайность льнопродукции на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве отмечена при содержании подвижного фосфора  $\approx 200$  мг/кг [17]. При оптимальной обеспеченности льна фосфором увеличивалась урожайность льноволокна, улучшались его физико-механические свойства [18, 19]. По нашим данным, наиболее высокая урожайность льносоломы льна-долгунца получена при pH 5.1–6.0 ед. и повышенной и высокой обеспеченности почв фосфором. Изменение реакции почвенной среды как в сторону подкисления, так и в нейтральную сторону, вело к снижению урожайности и ее прибавки от эквивалентных доз фосфорных удобрений [20].

В Белоруссии дозы фосфорных удобрений рассчитывают с учетом обеспеченности почв  $P_2O_5$ , уровнем планируемой урожайности и биологических особенностей культур. В 2006–2015 гг. применение минеральных удобрений на пахотных почвах Белоруссии составляло 262 кг д.в./га, в том числе 43 кг  $P_2O_5$ /га. Это способствовало повышению содержания подвижного фосфора в почве до 188 мг/кг. В 2016–2020 гг. на 1 га пашни было внесено 173 кг NPK, в том числе 18 кг фосфора. Снижение применения фосфорных удобрений привело к уменьшению содержания подвижного фосфора за 4 года на 11 мг/кг почвы. Все это свидетельствовало о том, что созданный высокий уровень содержания фосфора поддерживается только при бездефицитном балансе этого элемента [21].

**Фосфатный режим почв.** Ввиду химического, физико-химического и биологического связывания

фосфатов, коэффициент использования  $P_2O_5$  из водорастворимых фосфорных удобрений не превышает 30–35%, а в некоторых случаях он гораздо меньше.

Для более детальной оценки фосфатного режима почв в зависимости от их свойств (в первую очередь величины pH) определяют различные фракции фосфатов, проводя для этого последовательное экстрагирование почвы различными по составу, концентрации и кислотно-основным свойствам растворами. Наиболее распространенные в мире методы – Чанга–Джексона [22], Хедли–Стюарта–Чаухана [23], Тиссена–Мойра [24], в России наиболее часто применяют метод Гинзбург–Лебедевой [25].

Последовательная экстракция позволяет судить о количестве фосфора, адсорбированного или поглощенного минеральными компонентами почвы, а также о фосфоре, содержащемся в более или менее дискретных химических соединениях. Следует отметить, что процесс трансформации фосфатов – многоступенчатый и длительный. Опыты с созданными искусственными фосфатными фонами показали, что внесение высоких доз фосфорных удобрений приводит к существенному повышению содержания подвижных, а также легкоподвижных, соединений, доступных для растений.

По данным работы [26], при высоких дозах фосфорных удобрений, не использованными растениями фосфаты переходили в основном в наиболее растворимые фракции кальция. Под действием известкования по 1.5  $H_t$  доля Ca-P<sub>I</sub> увеличилась с 39 до 50, Ca-P<sub>II</sub> – с 16 до 27%. Скорость образования Al-P была в 3 раза больше, чем Fe-P.

Фракционно-групповой состав минеральных фосфатов существенно зависит от химического состава материнской почвообразующей породы. По данным [27], в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве, сформированной на желто-бурой некарбонатной покровной глине, в условиях Предуралья установлено, что фракционный состав минеральных фосфатов на 40–62% был представлен фосфатами железа и на 31–48% – фосфатами кальция, что было связано с характерными особенностями почвообразующей породы.

В работе [28] в орошаемой светло-каштановой тяжелосуглинистой почве в условиях Саратовского Заволжья отмечено высокое (в сравнении с почвами этого типа других регионов) содержание 2-й и 3-й фракций «активных» минеральных фосфатов. За 12-летний период содержание этих форм фосфатов в почве без внесения фосфорных удобрений снизилось на 52% от исходного уровня. По мнению автора, это свидетельствовало о пополнении за счет них фракции подвижного фосфора, что объясняет длительное сохранение содержания его на уровне, близком к исходному.

Создание высокого фосфатного уровня значительно повышает эффективность азотных и калийных удобрений, обеспечивает получение более стабильной урожайности, что важно в условиях меняющегося климата. Неудачно названное «зафосфачивание» почв, связанное со значительным превышением внесения фосфора над выносом его урожаем, приводит к значительному увеличению содержания подвижного фосфора (600–1000 мг/кг почвы). При резком снижении или даже прекращении внесения фосфорных удобрений в таких почвах ранее не использованный «остаточный» фосфор хорошо доступен для растений в течение многих десятилетий. Одновременно происходит трансформация труднорастворимых фосфатов в более подвижные формы [26].

При изучении последствий остаточных фосфатов среднегодовая продуктивность культур в севообороте картофель–ячмень–многолетние травы 2-х лет использования–озимая пшеница была на уровне 30–33 ц з.е./га, что сопоставимо с периодом прямого 10-летнего действия фосфорных удобрений (40–48 ц з.е./га). При этом скорость снижения содержания подвижного фосфора в дерново-подзолистой почве (по Кирсанову) зависела от количества внесенного фосфора сверх выноса  $P_2O_5$  урожаями культур, гранулометрического состава почвы и известкования. Авторами показано, что известкование умеренными дозами снижало скорость перехода фосфатов удобрений в менее растворимые формы [26].

*Великобритания.* Зарубежные исследователи считают, что определение фракционно-группового состава фосфатов одного образца почвы дает данные, которые представляют собой не более чем «снимок времени» [29–31].

Только при наличии архивных образцов почвы изменение содержания фосфора в различных фракциях почвы можно связать с балансом фосфора.

В работе [32], используя архивные и текущие образцы почвы, оценили изменение фракционно-группового состава фосфатов в истощающих экспериментах на Ротамстедской опытной станции в Великобритании. В этом сверхдлительном полевом опыте, заложенном в 1856 г., можно выделить 3 различных периода: 1 – без применения фосфорных удобрений, 2 – внесение суперфосфата (1856–1901 гг.) и органических удобрений (1876–1901 гг.), 3 – прекращение внесения фосфорных удобрений (с 1901 г.) и изучение их последствий.

Пробы почвы отбирали из верхнего 23-см слоя почвы, в почвенном банке имелись образцы за 1856, 1903 и 1993 гг. В качестве экстрагентов использовали (последовательно) анионообменные мембраны, 0.5M  $NaHCO_3$ , 0.1M  $NaOH$ , 1M  $NaOH$ , 0.5M  $H_2SO_4$  [30].

Результаты исследования показали, что до 1901 г., когда баланс фосфора был положительным (за счет применения суперфосфата и навоза), происходило накопление P в почве. При этом наблюдали увеличение содержания всех первых 5-ти фракций фосфора. В период истощения фосфором (1901–1993 гг. во всех вариантах) отмечены отрицательные изменения также во всех фракциях (табл. 2).

На эти положительные и отрицательные изменения приходилось почти 90% увеличения или уменьшения количества общего почвенного фосфора. Изменение содержания фосфора, экстрагируемого анионообменными мембранами, внесло наибольший вклад (25%) в изменение общего содержания фосфора. При этом сумма изменения P во всех 5-ти фракциях (выраженная в кг/га) не учитывала весь баланс фосфора. Вероятно, это было связано с тем, что авторы рассчитывали разницу между аналитическими показателями, и любая небольшая ошибка в определении фосфора в каждой фракции увеличивала общую ошибку опыта [31].

**Таблица 2.** Взаимосвязь между балансом фосфора и изменением запасов в различных фракциях фосфора в почве («Истощающий эксперимент», Ротамстедская опытная станция [31])

Вариант	Баланс $P_2O_5$ , кг/га	Изменение запасов фосфора в различных фракциях, кг P/га					
		Анионит-обменные мембраны	0,5M $NaHCO_3$	0,1M $NaOH$	1M $NaOH$	0,5M $H_2SO_4$	Сумма P во всех фракциях
1. Без удобрений (1903–1993 гг.)	–300	–49	–20	–195	–82	–19	–365
2. Навоз 1-й период (внесение 1876–1901 гг.)	1035	193	129	133	107	335	917
2-й период (последствие 1903–1993 гг.)	–752	–259	–123	–159	–112	–164	–817
3. Суперфосфат 1-й период (внесение 1856–1901 гг.)	1222	158	126	79	7	270	640
2-й период (последствие 1903–1993 гг.)	–644	–234	–138	–114	45	–253	–694

Данные эксперимента свидетельствовали об обратимом перераспределении фосфора между различными фракциями. Таким образом, фосфор, накопленный в более прочно удерживаемых формах, впоследствии может высвободиться и поглощаться выращиваемыми культурами.

В Великобритании оптимальные показатели содержания подвижного фосфора находятся на уровне 2-го класса — 16–25 мг/кг почвы (по Олсену). При этих показателях или меньше рекомендуют вносить фосфорные удобрения, чтобы поддерживать или повышать содержание подвижного фосфора в почве. В последние годы методические подходы были пересмотрены. Сейчас они основаны на принципе «кормить урожай, а не почву» [30]. Это включает в себя допущение снижения нижней границы оптимального содержания подвижного фосфора со 2-го (16–25 мг/кг) до 1-го класса (10–15 мг/кг почвы) [29]. Конечно, такой подход вряд ли приемлем для России, т.к. он требует ежегодного мониторинга плодородия почв.

Весьма интересные данные были получены в длительном полевом опыте на Ротамстедской опытной станции в Англии [32]. Эксперимент проводили в 1985–2000 гг. на тяжелосуглинистой почве с нейтральной реакцией среды. Схема опыта включала в себя контроль (без удобрений), азотно-калийный фон (N100K110), внесение фосфорных удобрений в дозе P80 с возрастающими дозами азота: 100, 200 и 300 кг N/га (табл. 3).

При возделывании озимой пшеницы как бесменно, так и в севообороте, наблюдали четкую взаимосвязь содержания подвижного фосфора в почве (по Олсену) с балансом  $P_2O_5$ . В то же время снижение содержания подвижного фосфора при бесменном возделывании озимой пшеницы происходило сильнее, чем в севообороте, даже при более низких (в 2.3 раза) показателях величины отрицательного баланса  $P_2O_5$ . По нашим расчетам, снижение содержания подвижного фосфора на 10 мг/кг происходило при превышении выноса  $P_2O_5$  урожаем над его внесением с удобрениями на 120–130 кг/га при бесменной культуре пшеницы и 400–500 кг/га при возделывании в севообороте. По-видимому, культуры из разных агробиологических групп способствуют более равномерному потреблению фосфатов из почвы. По данным [34], для снижения содержания подвижного фосфора в очень кислой почве с низкой обеспеченностью  $P_2O_5$  необходимо, чтобы превышение выноса фосфора урожаем было больше 900 кг  $P_2O_5$ /га, тогда как при высокой обеспеченности и слабокислой реакции почвенной среды он должен быть в несколько раз меньше (100–200 кг/га).

В той же дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве для увеличения содержания  $P_2O_5$  на 10 мг/кг при pH 5.5 необходимо внести 100 кг фосфора/га сверх выноса его урожаем, при pH 4.5

требуется значительно больше — 150–160 кг/га. Это также во многом согласуется с работой [34]. В опыте на нейтральной тяжелосуглинистой почве Ротамстедской опытной станции для увеличения содержания подвижного фосфора на 10 мг/кг требуется внести 40–50 кг  $P_2O_5$  сверх выноса его урожаем. Таким образом, несмотря на разные методические подходы к определению содержания подвижного фосфора в почве общие закономерности увеличения/уменьшения его содержания весьма близки.

Стоит отметить, что при определении коэффициента использования фосфора из внесенных удобрений разностным методом, величины коэффициента использования удобрений (КИУ) при бесменном возделывании озимой пшеницы были больше — 35–51 против 25–41% в севообороте. Это было связано с увеличением урожайности озимой пшеницы в севообороте как в контрольном, так и фоновом вариантах. С увеличением доз азотных удобрений увеличивалось и количество использованного из удобрений фосфора. Наоборот, при расчете коэффициента использования фосфора балансовым методом (по отношению поступления к выносу фосфора урожаем) он был больше в севообороте (63–79%), чем при бесменном возделывании пшеницы (50–65%). Все это указывало на то, что разные методы могут дать противоположные результаты, и полученные выводы необходимо трактовать с учетом примененных подходов [33].

В опытах, проведенных на Ротамстедской опытной станции, обращает на себя внимание высокая окупаемость 1 кг фосфорных удобрений прибавкой урожайности зерна: 36–60 кг при бесменном возделывании озимой пшеницы и 22–39 кг — в севообороте. Главным приемом повышения окупаемости является увеличение доз азота до 200 кг/га. По-видимому, и в наших опытах не нужно ограничиваться дозой азота 120 кг/га, необходимо изучить влияние и более высоких доз. Тем более, что это будет способствовать не только дальнейшему росту урожайности, окупаемости фосфорных и калийных удобрений, но и повышению содержания белка в зерне.

*Kumai.* Длительный полевой опыт с бесменной кукурузой был заложен в 1990 г. на Китайской национальной базе мониторинга плодородия почв и эффективности удобрений для черноземных почв (Black Soil) [35]. Почва опытного участка тяжелосуглинистая, по классификации ФАО относится к Luvic Phaeozem. Агрохимические показатели были следующими: рН<sub>H2O</sub> составляла 7.6 ед., содержание почвенного органического углерода — 2%, подвижного фосфора (по Олсену) — 27, калия — 228 мг/кг почвы. Схема опыта включала следующие варианты: 1 — контроль (без удобрений), 2 — N50K82, 3 — N50K82 + P82, N50K82 + P82 + навоз (свиной — с 1990–2004 гг., КРС — с 2005–2018 гг.). С навозом поступало: азота — 115, фосфора — 89 и калия — 92 кг/га (табл. 4).



**Таблица 3.** Урожайность озимой пшеницы и содержание подвижного фосфора (по Олсену) в зависимости от баланса  $P_2O_5$  на фоне возрастающих доз азота (Брудбалк, Ротамстед, Великобритания, 1985–2000 гг. [33])

Показатель	Вариант				
	Контроль (без удобрений)	N100K110	N100K110 + P80	N200K110 + P80	N300K110 + P80
1. Озимая пшеница бессменно					
Содержание $P_2O_5$ (по Олсену), мг/кг	16	9	267	174	167
Урожайность зерна, ц/га	11.7	24.6	53.2	65.8	72.9
Баланс $P_2O_5$ за 16 лет:	0	0	1280	1280	1280
1. Поступление с удобрениями, кг/га					
2. Вынос с урожаем (зерно + солома), кг/га	136	183	638	755	835
3. Баланс, кг/га	–136	–183	642	525	445
Коэффициенты использования $P_2O_5$ , %					
Разностный метод	—	—	35	45	51
Балансовый метод	—	—	50	59	65
Эффективность использования $P_2O_5$					
Кг зерна/кг потребленного $P_2O_5$	138	215	134	139	140
Кг зерна/кг внесенного $P_2O_5$	—	—	66	82	91
Окупаемость 1 кг $P_2O_5$ , кг	—	—	36	52	60
2. Озимая пшеница в севообороте					
Содержание $P_2O_5$ (по Олсену), мг/кг	21	14	197	183	176
Урожайность зерна, ц/га	22.5	55.3	72.6	87.6	86.7
Баланс $P_2O_5$ за 16 лет:	0	0	1280	1280	1280
1. Поступление с удобрениями, кг/га					
2. Вынос с урожаем (зерно + солома), кг/га	245	484	802	982	1008
3. Баланс, кг/га	–245	–484	478	298	272
Коэффициенты использования $P_2O_5$ , %					
Разностный метод	—	—	25	39	41
Балансовый метод	—	—	63	77	79
Эффективность использования $P_2O_5$					
Кг зерна/кг потребленного $P_2O_5$	147	183	145	143	138
Кг зерна/кг внесенного $P_2O_5$	—	—	91	109	108
Окупаемость 1 кг $P_2O_5$ , кг	—	—	22	40	39

В качестве минеральных удобрений использовали карбамид, аммофос, сульфат калия. Всю дозу фосфора и калия, а также 1/3 азота вносили под предпосевную культивацию и 2/3 азота — в подкормку, заделывая удобрения в междурядья. Площадь делянок составляла 400 м<sup>2</sup>, размещение рандомизированное, повторность трехкратная. Кукурузу высевали в апреле из расчета 60 тыс. семян/га [35].

Применение N50K82 в период с 1990–2000 гг. способствовало повышению урожайности кукурузы на 48 ц/га по сравнению с контролем, а дополнительное внесение фосфора и навоза не способствовало дальнейшему существенному росту урожайности. В последующие периоды действие фосфора

существенно возрастало, обеспечивая прибавку урожайности 12–34 ц/га к фону N50K82. Увеличение разрыва в урожайности, с одной стороны, было обусловлено значительным уменьшением содержания фосфора в контрольном и фоновом вариантах, с другой — существенному повышению  $P_2O_5$  в почве при внесении P82 и дополнительном поступлении фосфора с навозом (в сумме 171 кг/га). При этом отмечен значительный рост окупаемости примененных фосфорных удобрений. Например, если в первый период окупаемость 1 кг фосфора прибавкой урожайности зерна кукурузы равнялась 6 кг, во 2-й — 14, то в 3-й — уже 41 кг. Разностный коэффициент использования фосфора из удобрений планомерно увеличивался с 4



**Таблица 4.** Урожайность кукурузы и содержание подвижного фосфора в почве в зависимости от баланса  $P_2O_5$  (длительный полевой опыт с бессменной кукурузой Китайской национальной базы мониторинга плодородия почв и эффективности удобрений на черноземах (Black Soil) [35])

Вариант	Баланс фосфора (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), кг/га			Содержание подвижного фосфора по Олсену, мг/кг	Урожайность зерна кукурузы (прибавка от фосфора*), ц/га
	поступ-ление	вынос	+/-		
1990–2000 гг.					
1. Контроль (без удобрений)	0	41	–41	19	39
2. N50K82	0	89	–89	23	87
3. N50K82 + P82	82	92	–10	37	92 (+5)
4. N50K82 + P82 + навоз (N115P89K92)	171	87	84	44	86
2001–2010 гг.					
1. Контроль (без удобрений)	0	32	–32	12	31
2. N50K82	0	82	–82	14	81
3. N50K82 + P82	82	94	–12	67	93 (+12)
4. N50K82 + P82 + навоз (N115P89K92)	171	101	70	314	99
2011–2018 гг.					
1. Контроль (без удобрений)	0	34	–34	10	34
2. N50K82	0	73	–73	14	73
3. N50K82 + P82	82	110	–28	109	107 (+34)
4. N50K82 + P82 + навоз (N115P89K92)	171	119	52	398	115

\*Прибавка от внесения P82 указана в скобках по отношению к варианту N50K82.

до 45%. Обеспечение положительного баланса фосфора при органо-минеральной системе удобрения с превышением выноса  $P_2O_5$  урожаем в 1.4–1.7 раза способствовало повышению содержания в почве подвижного фосфора (по Олсену) с 27 до 398 мг/кг, или в 14 раз. Конечно, столь значительное содержание подвижного фосфора, превышающее оптимальное для данных почв (16–25 мг P/кг или 37–57 мг  $P_2O_5$ /кг) не сопровождалось дальнейшим ростом урожайности кукурузы [36]. По нашему мнению, внесение 90 кг  $P_2O_5$ /га являлось достаточным для обеспечения бездефицитного баланса и сохранения содержания подвижного фосфора на уровне 2–3-го класса, а также реализации генетического потенциала культуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты длительных полевых опытов свидетельствовали о необходимости дальнейшего углубления исследований в области оптимизации фосфатного режима почв и повышения эффективности фосфорных удобрений. Вполне очевидно, что в каждом длительном опыте необходимо создавать

архив почвенных образцов, который позволит более надежно оценивать изменение фракционно-группового состава фосфатов, физико-химических свойств почвы, что, в свою очередь, даст возможность для объективной оценки динамики фосфатного режима почв с учетом складывающегося баланса  $P_2O_5$ .

Данные большинства экспериментов свидетельствовали об обратимом перераспределении фосфора между различными фракциями. Фосфор, накопленный в более прочно удерживаемых формах, впоследствии может высвобождаться и поглощаться выращиваемыми сельскохозяйственными культурами. При этом содержание подвижного фосфора на уровне 100–125 мг/кг и степени подвижности 0.12–0.15 мг/л при  $pH_{KCl}$  5.3–5.5 для тяжелосуглинистых дерново-подзолистых почв Нечерноземья можно считать оптимальным для получения урожайности зерновых культур на уровне 60 ц/га. При таких агрохимических показателях дозы фосфорных удобрений можно рассчитывать по величине его выноса урожаем.

Разностный коэффициент использования фосфора из удобрений при возделывании озимой пшеницы в севообороте в условиях опытной станции ВНИИ

агрохимии составил 25–27, Ротамстедской станции – 25–41%. В опыте на Китайской национальной базе мониторинга плодородия почв и эффективности удобрений на черноземах (Black Soil) КИУ фосфора кукурузой составил 45%.

Обращает на себя внимание высокая окупаемость фосфорных удобрений в опытах на Ротамстедской опытной станции (Великобритания) – 22–39 кг зерна/кг  $P_2O_5$  (при возделывании озимой пшеницы в севообороте). Главным приемом повышения окупаемости в этом случае было применение высоких доз азота – до 200 кг/га. По-видимому, и в наших опытах не нужно ограничиваться дозой азота 100–120 кг/га, необходимо изучать влияние и более высоких доз. К тому же это будет способствовать не только росту урожайности, но и повышению содержания белка в зерне.

Во всех длительных полевых опытах наблюдали увеличение разрыва в урожайности между вариантами НК и НК + Р с течением времени. С одной стороны, это обусловлено значительным уменьшением содержания фосфора в фоновом варианте НК, в котором вынос фосфора значительно превосходил контроль (без удобрений), с другой, – существенным повышением содержания  $P_2O_5$  в почве при положительном балансе. В таком случае необходимо разграничивать роль вклада фосфора почвы (остаточных фосфатов) и фосфорных удобрений в формирование продуктивности культур.

Существенными приемами повышения эффективности фосфорных удобрений является известкование кислых почв до слабокислой реакции, использование цинковых микроудобрений, а также фосфатмобилизующих микроорганизмов [37]. Кроме того, важнейшей задачей является совершенствование существующих методов определения подвижного фосфора для различных типов почв страны ввиду их низкой схожимости с эффективностью фосфорных удобрений.

Необходимо шире использовать новые методы определения доз минеральных удобрений. Наиболее перспективным является подход, разработанный в работе [38], который учитывает комплекс агрохимических показателей почвы с учетом планируемой урожайности, позволяющий установить границу окупаемости удобрений и выбрать оптимальную дозу для конкретных условий производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Новиков Н.Н. Биохимия растений. М: ЛЕНАНД, 2022. 680 с.
- Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 г. Министерство природных ресурсов и экологии РФ, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра) / Под ред. Д.Д. Тетенькина, Е.И. Петрова. М., 2022. 622 с.
- Geological U.S. Survey. Mineral commodity summaries. Available at USGS website (NMIC, National Minerals Information Center) on January, 2022.
- Налиухин А.Н. 80 лет Географической сети полевых опытов с удобрениями // Плодородие. 2021. № 3(120). С. 6–8.
- Росстат. Внесение удобрений под урожай 2022 г. и проведение работ по химической мелиорации земель. [http://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Vnesen\\_udobren](http://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Vnesen_udobren)
- Сычев В.Г., Шафран С.А. О балансе питательных веществ в земледелии России // Плодородие. 2017. № 1. С. 1–4.
- Шафран С.А., Кирпичников Н.А., Ермаков А.А., Семенова А.И. Динамика содержания подвижного фосфора в почвах Нечерноземной зоны и его регулирование // Агрохимия. 2021. № 5. С. 14–20. DOI: 10.31857/S0002188121050100
- Кирпичников Н.А., Бижан С.П. Влияние последнего известия и систематического применения удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистей почвы и урожайность зерновых культур // Агрохимия. 2023. № 4. С. 39–43. DOI: 10.31857/S0002188123040063
- Кирпичников Н.А. Влияние извести на фосфатный режим слабокультуренной дерново-подзолистей почвы при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2016. № 12. С. 3–8.
- Налиухин А.Н., Бижан С.П., Старостина Е.Н. Эффективность применения микроудобрений при возделывании зерновых культур на тяжелосуглинистых дерново-подзолистых почвах Центрального Нечерноземья // Изв. ТСХА. 2022. № 4. С. 5–15. DOI: 10.26897/0021-342X-2022-4-5-15
- Шильников И.А., Сычев В.Г., Зеленев Н.А., Аканова Н.И., Федотова Л.С. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. С. 105–300.
- Ельников И.И., Пивоварова И.А. О варьировании относительного оптимума содержания подвижного фосфора в почве в условиях Нечерноземной зоны // Агрохимия. 1985. № 2. С. 113–124.
- Кулаковская Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М., 1990. 218 с.
- Кирпичников Н.А., Мергель С.В., Черных И.Н., Черных Н.А. К вопросу об оптимизации фосфатного режима дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв // Агрохимия. 1993. № 8. С. 12–20.
- Чумаченко И.Н., Сушеница Б.А., Алиев Ш.А., Капранов В.Н., Дышко В.Н., Прудников П.В. Закономерности формирования фосфатного фонда почв при применении биогенных веществ в составе нетрадиционного минерального сырья и продуктивность

- их использования // Бюл. ВНИИА, 2003. № 117. С. 134–136.
16. Касицкий Ю.И. Об оптимальном содержании подвижного фосфора в почвах Нечерноземной зоны СССР // Агрохимия. 1991. № 6. С. 107–125.
17. Петрова Л.И., Анюшина Т.Г. Оптимальные параметры агрохимических свойств окультуренной дерново-подзолистой почвы в льняном севообороте // Сб. научн. тр. ВНИИЛ. Вып. XXIII. 1986. С. 92–101.
18. Сорокина О.Ю. Оптимизация агрохимических характеристик почвы — основа улучшения качества льнопродукции // Мат-лы Всерос. совещ. «Экологические функции агрохимии в современном земледелии». М.: ВНИИА, 2008. С. 189–192.
19. Тихомирова В.Я. Урожайность и качество волокнистой льнопродукции при разной обеспеченности почвы фосфором и калием // Плодородие. 2010. № 1. С. 9–10.
20. Налиухин А.Н., Шафран С.А. Окупаемость фосфорных удобрений прибавкой урожая льна-долгунца на дерново-подзолистых почвах // Плодородие. 2014. № 3. С. 2–4.
21. Сычев В.Г., Лапа В.В., Цыганов А.Р., Цыганова А.А., Тарасевич А.Г. Фосфор в почвах и системе удобрения сельскохозяйственных культур в республике Беларусь // Плодородие. 2023. № 5(134). С. 47–50. DOI: 10.25680/S19948603.2023.134.12
22. Chang S.C., Jackson M.L. Fractionation of soil phosphorus // Soil Sci. 1957. V. 84. P. 133–144.
23. Hedley M.J., Stewart J.W.B., Chauhan B.S. Changes in inorganic and organic phosphorus induced by cultivation practices and laboratory incubations // Soil Sci. Soc. Am. J. 1982. V. 46. P. 970–976.
24. Tiessen H., Moir J.O. Characterization of available P by sequential extraction. // Soil sampling and methods of analysis / Ed. M.R. Carter. Can. Soil Sci. Soc., Boca Raton, FL.: Lewis Publ., 1993. P. 75–86.
25. Гинзбург К.Е., Лебедева Л.С. Методика определения минеральных форм фосфатов почвы // Агрохимия. 1971. № 1. С. 125–136.
26. Кирпичников Н.А., Адрианов С.Н. Действие и последствие фосфорных удобрений на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве при различной степени известкования // Агрохимия. 2007. № 10. С. 14–23.
27. Васбиева М.Т., Завьялова Н.Е. Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы естественных и агрофитоценозов // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2021. Вып. 107. С. 92–115. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-92-115
28. Конончук В.В. Оптимизация системы удобрения в зернокармном севообороте на светло-каштановой почве Поволжья при орошении: Автореф. ... д-ра с.-х. наук. М.: ВНИИА, 2004. 35 с.
29. Blackwell M.S.A., Darch T., Haslam R. Phosphorus use efficiency and fertilizers: future opportunities for improvements // Front. Agr. Sci. Eng. 2019. V. 6(4). P. 332–340. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019274>
30. Withers P.J.A., Sylvester-Bradley R., Jones D.L., Healey J.R., Talboys P.J. Feed the crop not the soil: rethinking phosphorus management in the food chain // Environ. Sci. Technol. 2014. V. 48(12). P. 6523–6530.
31. Johnston A.E., Poulton P.R. Phosphorus in agriculture: A Review of results from 175 years of research at Rothamsted, UK // J. Environ. Qual. 2019. V. 48(5). <https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0078>
32. Blake L., Johnston A.E., Poulton P.R., Goulding K.W.T. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods // Plant Soil. 2003. V. 254. P. 245–261.
33. Syers J.K., Johnston A.E., Curtin D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. Rome: FAO, 2008. P. 37–38.
34. Шафран С.А., Кирпичников Н.А., Ермаков А.А., Семенова А.И. Динамика содержания подвижного фосфора в почвах Нечерноземной зоны и его регулирование // Агрохимия. 2021. № 5. С. 14–20. DOI: 10.31857/S0002188121050100
35. Wang Q., Qin Zhen-han, Zhang Wei-wei, Chen Yan-hua, Zhu Ping, Peng Chang, Wang Le, Zhang Shu-xiang, Colinet G. Effect of long-term fertilization on phosphorus fractions in different soil layers and their quantitative relationships with soil properties // J. Integrat. Agricult. 2022. V. 21. DOI: 10.1016/j.jia.2022.07.018
36. Wu Q.H., Zhang S.X., Feng G., Zhu P., Huang S.M., Wang B.R., Xu M.G. Determining the optimum range of soil Olsen P for high P use efficiency, crop yield, and soil fertility in three typical cropland soils // Pedosphere. 2020. V. 30. № 6. P. 832–843.
37. Кирпичников Н.А., Бижан С.П. Приемы повышения эффективности фосфорных удобрений в зависимости от известкования при возделывании зерновых культур на дерново-подзолистой почве // Агрохимия. 2022. № 7. С. 33–39. DOI: 10.31857/S0002188122070079. EDN JIVLVU
38. Шафран С.А. Научные основы и современные методы определения доз применения минеральных удобрений. М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2022. 236 с. DOI: 10.25680/VNIIA.2019.25.58.108

## Efficiency of Phosphorus Fertilizers: Research Results in Long-Term Field Experiments in Russia, Great Britain and China

A. N. Naliukhin<sup>a, #</sup>, N. A. Kirpichnikov<sup>b</sup>, S. P. Bizhan<sup>b</sup>, Yu. E. Guseva<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Russian State Agrarian University—Timiryazev Moscow Agricultural Academy,  
ul. Pryanishnikova 6, Moscow 127434, Russia*

<sup>b</sup>*D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry,  
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia,*

<sup>#</sup>*E-mail: naliukhin@yandex.ru*

The results of research in long-term field experiments on the effectiveness of phosphorus fertilizers are presented. All experiments were based on the classical scheme and included, in addition to the control variant (without fertilizers), a nitrogen-potassium background, on which the effectiveness of phosphorus fertilizers was studied. At the same time, regional specifics were taken into account in each experiment: liming at the Experimental Station of the All-Russian Research Institute of Agrochemistry (Russia), the effectiveness of phosphorus fertilizers at increasing doses of nitrogen N100–300 at the Rothamsted Experimental Station (Great Britain), a combination of phosphorus fertilizers with manure at the Chinese National Soil Fertility Monitoring Base. In long-term experiments, the dynamics of changes in the content of mobile phosphorus, as well as individual fractions, taking into account the emerging balance of  $P_2O_5$ , are presented. It is shown that the redistribution of phosphorus between different soil fractions is reversible, and the direction of the processes depends on the emerging balance of  $P_2O_5$ . Phosphorus accumulated in more firmly held forms can subsequently be released and absorbed by cultivated crops. In all field experiments an increase in the yield gap between NK and NK + P variants was observed over time. On the one hand, this is due to a significant decrease in the phosphorus content in the background NK variant (in acidic soils – also an increase in Al mobility), in which phosphorus removal significantly exceeds control (without fertilizers), on the other – a significant increase in the content of  $P_2O_5$  in the soil with a positive balance. In a long-term experiment at the Experimental Station of the Institute of Agrochemistry, the difference coefficient of phosphorus utilization from fertilizers was 25–27, at the Rothamsted station – 25–41, at the Chinese National Soil Fertility Monitoring Base – 45%. Attention is drawn to the high payback of phosphorus fertilizers in experiments at the Rothamsted experimental station (Great Britain) – 22–39 kg of grain/kg of  $P_2O_5$  (when cultivating winter wheat in crop rotation). The main method of increasing payback in this case was the use of high doses of nitrogen – up to 200 kg N/ha. Studies have shown that liming acidic soils to a slightly acidic reaction, the use of zinc micronutrients, as well as phosphate-mobilizing microorganisms, are essential methods to increase the effectiveness of phosphorus fertilizers.

**Keywords:** phosphorus fertilizers, long-term field experience, phosphate regime of soils, phosphorus balance, yield.