

2. ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ И ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ

УДК [631.85+631.83]:[630*114.52:631.445.24]

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ ФОСФОРНЫХ И КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И ПЛОДОРОДИЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ

**В. В. Лапа, Н. Н. Семененко, Е. Г. Мезенцева,
Н. Н. Ивахненко, А. А. Грачева**

*Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

В Беларуси проблема повышения экономической и экологической эффективности использования земельных ресурсов и удобрений имеет первостепенное значение. Базой устойчивого развития аграрной отрасли и повышения ее эффективности является плодородие почв. Потому для его повышения и сохранения систематически проводится известкование и применяются органические и минеральные удобрения, на что тратятся значительные материальные и финансовые средства. За счет рационального применения удобрений на дерново-подзолистых почвах формируется до 50 % дополнительной прибавки урожая и повышается плодородие почв [1]. По данным последнего тура агрохимических исследований установлено, что уже около 30 % обследуемой площади пашни Беларуси занимают высококультурные земли, часть из которых содержит более 800 мг/кг почвы подвижных соединений фосфатов и более 400 мг/кг почвы K_2O , это значительно превышает оптимальный уровень [2]. В то же время, как показывает анализ статистических данных, в отдельных сельхозпредприятиях, районах и областях периодически, особенно в последние годы (2016–2018 гг.), существенно снизились объемы применения удобрений. По сравнению с периодом 2011–2015 гг. они по стране составляют лишь 40 %. Наиболее значительный дефицит минеральных удобрений сложился в Витебской и Могилевской областях, где применение азотных сократилось на 40–44, фосфорных – на 76–80 и калийных – на 55–64 %. В этих областях применяемые на пашне дозы фосфорных удобрений достигли уровня 7 и 12 кг/га соответственно, а на лугах и пастбищах вообще не применяются. Исследованиями установлено, что уровень продуктивности пашни и луговых угодий, плодородия почв находится в тесной зависимости от применяемых доз минеральных и органических удобрений. Потому в этих областях ощущается наибольшее снижение продуктивности как пашни, так лугов и пастбищ, плодородия почв.

В связи с неизбежным постоянным повышением затрат на применение удобрений возрастает значимость разработки критериев сбалансированного (почва + удобрение) применения элементов минерального питания возделывае-

мых культур. Потому при разработке приемов устойчивого и эффективного развития агроценозов необходимо учитывать длительность эффективного последствия минеральных удобрений. Важно отметить, что последствие азотных удобрений на последующие культуры незначительное. В наших исследованиях с применением изотопа азота N^{15} установлено, что почвой поглощается до 40 % азота при основном внесении всей дозы удобрения [3, 4]. Поглощенный азот удобрения очень интенсивно переходит в органические соединения. Через 30 суток в минеральной форме находилось только 3–5 % от внесенной дозы. Исследованиями ряда авторов установлено, что эта фракция азота слабо используется последующими культурами, так как она становится доступной растениям только после отмирания белковых тел микроорганизмов [5–7].

Результаты многочисленных исследований говорят о том, что фосфорные и калийные удобрения имеют важное свойство: пролонгированное действие, способность оказывать положительное влияние на условия минерального питания возделываемых культур не только в год внесения, но и в течение ряда последующих лет. Коэффициент использования внесенных фосфорных удобрений в первый год чаще всего, особенно на почвах повышенной и высокой обеспеченности фосфатами, не превышает 5–10 %. Только на почвах низкой обеспеченности фосфатами коэффициент использования фосфорных удобрений может достигать 15–20, а за севооборот – 40 %. Остаточное количество фосфатов удобрения поглощается в почве поверхностно сорбционно, оно представлено более доступными растениям соединениями (по химическому типу – с образованием разной степени растворимости и доступности растениям соединений полуторных окислов, кальция, магния, калия). Результаты исследований ряда авторов показывают, что последствие фосфорных удобрений может проявляться в течение нескольких десятилетий [8, 9]. Имеющиеся литературные данные по последствию калия не однозначны. Одни авторы утверждают, что последствие калийных удобрений может проявляться в течение 18–20 и более лет, а другие – 2–4 лет [10–14]. Таким образом, ожидаемое последствие разных видов минеральных удобрений существенно различается.

Цель исследований – установить длительность последствия остаточных количеств фосфора и калия, вносимых с минеральными и органическими удобрениями в предшествующий период, на продуктивность сельскохозяйственных культур и плодородие дерново-подзолистой супесчаной почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводили в период 1986–2018 гг. в два этапа в длительном стационарном полевом опыте в ПРУП «Экспериментальная база им. Котовского» Узденского района на дерново-подзолистой супесчаной почве, подстилаемой с глубины 30–50 см песком. Пахотный слой почвы перед закладкой опыта в 1986 г. характеризовался следующими усредненными показателями: pH_{KCl} – 5,8, содержание P_2O_5 – 94, K_2O – 225 мг/кг почвы, гумус – 2,1 %.

В первый этап (1986–1998 гг.) ставилась цель – за счет известкования, применения органических и минеральных удобрений в трех ротациях культур зернопропашного севооборота довести агрохимические свойства, прежде всего содержание подвижных форм фосфатов, исследуемых почв до оптимального уровня. Суммарная доза внесенных органических удобрений в виде навоза КРС за весь период составила 120 т/га и больше органические удобрения не вноси-

лись. Среднегодовые показатели внесения удобрений (т/га, кг/га д. в.), продуктивности культур (ц/га к. ед.) и изменения в содержании подвижных соединений фосфора и калия представлены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние удобрений на продуктивность и изменение содержания подвижных форм фосфора и калия в дерново-подзолистой супесчаной почве (за период 1986–1998 гг.)

№ варианта опыта	Среднегодовое внесение удобрений, т, кг/га д. в.	Среднегодовая продуктивность, ц/га к. ед.	Изменения содержания в почве, мг/кг					
			P ₂ O ₅			K ₂ O		
			1986 г.	1998 г.	+/- к исх.	1986 г.	1998 г.	+/- к исх.
1	Без удобрений	37,1	90	101	+11	227	148	–79
2	Навоз КРС, 10 т/га – Фон	41,1	82	108	+26	244	189	–55
3	Фон – N ₈₄ P ₆₁ K ₉₈	63,1	92	176	+84	210	215	+ 5
4	Фон – N ₇₉ P ₆₂ K ₉₈	61,9	100	173	+73	236	228	– 6
5	Фон – N ₈₇ P ₂₉ K ₉₈	57,1	93	154	+56	231	230	–8
6	Фон – N ₈₇ P ₆₁ K ₉₈	65,4	90	161	+71	224	218	–6
7	Фон – N ₈₂ P ₆₀ K ₉₈	61,0	112	166	+54	203	207	+4

Из приведенных данных видно, что внесением минеральных в дозе 240–245 кг/га д. в. NPK на фоне органических удобрений обеспечивается среднегодовая продуктивность культур севооборотов на уровне 61–65 ц/га к. ед., повышается содержание подвижных соединений фосфора в среднем на 72, достигая уровня 166–176 мг/кг почвы и сохраняется высокий уровень содержания калия (207–228 мг/кг почвы). При недостаточном внесении фосфорных удобрений (вариант 5, в среднем 29 кг/га P₂O₅) продуктивность культур снижается на 4–8 ц/га к. ед., меньше накапливается в почве подвижных соединений фосфора.

Во второй период исследований (1999–2018 гг.) в опыте планировалось установить длительность последствий остаточных количеств фосфора и калия, вносимых с минеральными и органическими удобрениями в предшествующий период, на продуктивность сельскохозяйственных культур и плодородие дерново-подзолистой супесчаной почвы. Следовало установить время, за которое почва по содержанию фосфора и калия возвращается в исходное состояние (1986 г.). С целью изучения длительности последствий и действия внесенных удобрений в схеме опыта были предусмотрены варианты внесения полного (NPK), а также с исключением азотных (PK), фосфорных (NK) и калийных (NP) удобрений.

В этот период в опыте чередование культур было следующим: вико-овсяная смесь (1999) – озимое тритикале (2000) – люпин (2001) – картофель (2002) – ячмень (2003) – горохо-овсяная смесь (2004) – озимое тритикале (2005) – люпин (2006) – ячмень (2007) – горохо-овсяная смесь (2008) – озимое тритикале (2009) – овес (2010) – яровой рапс (2011) – яровая пшеница (2012) – горохо-овсяная смесь (2013) – озимая пшеница (2014) – ячмень (2015) – яровой рапс (2016) – горохо-овсяная смесь (2017) – кукуруза (2018).

Из удобрений применялась аммиачная селитра или мочевины, двойной суперфосфат и калий хлористый. Дозы и сочетания видов удобрений по пятилеткам (ротациям) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Схема опыта и распределение удобрений по ротациям севооборотов (1999–2018 гг.)

Вариант опыта	Средние дозы NPK по ротациям севооборотов, кг/га				Внесено NPK, кг/га	
	1999– 2003 гг.	2004– 2008 гг.	2009– 2013 гг.	2014– 2018 гг.	сумма за 20 лет	в среднем за год
1. Без удобрений (контроль)	–	–	–	–	–	–
2. П. д.* наво- за – фон	–	–	–	–	–	–
3. Фон + РК	P ₄₀ K ₂₃	P ₄₀ K ₈₀	P ₄₀ K ₉₆	P ₄₈ K ₁₂₄	P ₈₄₀ K ₁₂₁₅	P ₄₂ K ₉₆
4. Фон + NP (п. д. калия)	N ₆₄ P ₄₀	N ₆₂ P ₄₀	N ₉₆ P ₄₀	N ₁₀₂ P ₄₆	N ₁₆₂₀ P ₈₃₀	N ₈₁ P ₄₂
5. Фон + NK (п. д. фосфора)	N ₆₄ K ₈₃	N ₆₂ K ₈₁	N ₉₈ K ₉₆	N ₉₈ K ₁₁₈	N ₁₆₁₀ P ₁₃₉₀	N ₈₁ K ₉₅
6. Фон + N (п. д. фосфора и ка- лия)	N _{64,3}	N _{62,2}	N ₉₈	N ₁₂₀	N ₁₇₂₂	N _{86,1}
7. Фон + NPK	N ₆₄ P ₂₆ K ₈₃	N ₅₀ P ₃₄ K ₃₁	N ₉₈ P ₄₀ K ₉₆	N ₁₀₈ P ₄₆ K ₁₁₈	N ₁₆₀₀ P ₇₃₀ K ₁₈₉₀	N ₈₀ P ₃₇ K ₉₅

* П. д. – последствие.

Опыт заложен в одном поле. Общий размер делянки – 49,5 м² (5,5 м · 9,0 м).

Агротехника возделывания культур – рекомендуемая для центральной зоны на супесчаных почвах в соответствии с отраслевыми регламентами и рекомендациями [15–20].

В растительных образцах определены содержание общего азота (ГОСТ 13496.4-93), фосфора (ГОСТ 26657-85) и калия (ГОСТ 30504-97).

Химический анализ органических удобрений выполнен в соответствии с Государственными отраслевыми стандартами: определение влаги и сухого остатка – по ГОСТ 26713-85, общего фосфора – по ГОСТ 26717-85; общего калия – по ГОСТ 26718-85.

В почвенных образцах содержание фосфора и калия определяли по методу Кирсанова – ГОСТ 26487-85, органическое вещество в почве определяли по Тюрину в модификации ЦИНАО – ГОСТ 26213-84.

Дисперсионный анализ экспериментальных данных выполнен согласно методике полевого опыта Б. А. Доспехова с использованием соответствующих программ пакета MS Excel [21].

Погодные условия по годам в период проведения исследований существенно различались, что отражалось на уровне урожайности сельскохозяйственных культур и эффективности применяемых удобрений. Более благоприятные по гидротермическим условиям были 2000, 2004, 2005, 2009, 2012, 2013 и 2017 гг. В эти годы при внесении азотных, фосфорных и калийных удобрений по полной потребности сбор кормовых единиц достигал 75–111 ц/га. Менее благоприятные (недостаток или избыток влаги, низкие или высокие температуры в отдельные периоды вегетации культур) были – 1999, 2001, 2002, 2006, 2008–2010, 2014–2016 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные в табл. 3 результаты исследований показывают, что среднегодовая (из 20 лет) продуктивность культур за счет сформированного плодородия почвы составила 32,8 ц/га к. ед. В зависимости от состава культур по ротациям севооборота и погодных условий выход кормовых единиц колебался в пределах от 30,3 до 36,9 ц/га. От последствий применения органических удобрений полученная прибавка недостоверна (6 % к контролю). Однако во все годы исследования она имела место быть (+1,3–2,9 ц/га к. ед.). Вероятно, применение органических служит благоприятным агробиологическим фоном для более эффективного проявления действия минеральных удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур.

В среднем за 20 лет исследования самая высокая продуктивность исследуемых культур – 59,6 ц/га к. ед. получена при внесении полного удобрения $N_{80}P_{37}K_{95}$ на фоне последствий навоза. Прибавка к фону от внесения удобрения составила 24,9 ц/га к. ед., или 82 % к контролю. В зависимости от погодных условий и состава культур за ротацию прибавка продуктивности от внесенных удобрений колебалась от 50 % (1999–2003 гг.) до 110 % от общей. Более низкие уровни общей продуктивности и прибавки получены от внесения парных комбинаций и азотных удобрений. Среднегодовая прибавка продуктивности от внесения удобрений составила: $N_{81}P_{42}$ – 19,7; N_{86} – 16,1; $N_{81}K_{95}$ – 15,2 и $P_{42}K_{96}$ – 11,1 ц/га к. ед.

Таблица 3

Средняя продуктивность культур севооборотов, ц/га к. ед.

Система удобрения (среднегодовые дозы NPK)	Годы исследований						Прибавка к контролю	
	1999–2003	2004–2008	2009–2013	2014–2018	Среднее за 20 лет			
						ц/га	%	
1. Без удобрений (контроль)	32,0	36,9	30,3	32,2	32,8	–	–	
2. П. д.* навоза – Фон	33,9	39,8	31,6	33,5	34,7	1,9	6	
3. Фон + $P_{42}K_{96}$	41,6	55,5	43,1	42,8	45,8	13,0	40	
4. Фон + $N_{81}P_{42}$ (п. д. калия)	46,2	61,3	58,0	52,1	54,4	21,6	66	
5. Фон + $N_{81}K_{95}$ (п. д. фосфора)	44,9	59,0	48,7	46,9	49,9	17,1	52	
6. Фон+ $N_{86,1}$ (п. д. фосфора и калия)	46,3	55,6	55,7	42,3	50,8	18,0	55	
7. Фон + $N_{80}P_{37}K_{95}$	48,0	65,7	63,5	61,0	59,6	26,8	82	
HCP_{05}	1,9	2,1	2,2	1,8	–	–	–	

Это значит, что при последствиях калийных удобрений и, как следствие, недостаточном калийном питании, урожайность в сравнении с вариантом NPK снижается на 5,2 ц/га к. ед., или на 9 %. Внесение только азотных удобрений (дефицит фосфора и калия в почве) приводит к снижению урожайности на 8,8 ц/га к. ед., или на 15 %. Недостаточное фосфорное питание при последствиях фосфорных удобрений (вариант NK) приводит к снижению продуктивности культур на 16 % и недобору в среднем 9,7 ц/га к. ед. Наибольшее снижение продуктивности культур происходит в варианте без внесения азотных удобрений, которое в среднем составляет 13,8 (23 %), а в более благоприятные годы – 18,2–20,4 ц/га к. ед. Это значит, что на каждый килограмм азота удобрений недобираем около 20 к. ед., или на 1 рубль затрат на применение азотных удобрений теряется прибыль на уровне

10–12 рублей. Таким образом, по своему негативному влиянию на продуктивность сельскохозяйственных культур элементы минерального питания расположились в следующей последовательности: дефицит азота приводит к снижению продуктивности сельскохозяйственных культур – на 13,8; фосфора – на 9,7; суммы фосфора и калия – на 8,8; калия – на 5,2 ц/га к. ед.

Дефицит того или иного элемента минерального питания в применяемых в опыте системах удобрения оказывает существенное влияние на агрохимическую деградацию и плодородие почв. Анализ данных динамики содержания в почве подвижных соединений фосфора, связанной с последствием внесенных ранее фосфорных удобрений, показывает (табл. 4, 5 и рис. 1, 2), что оно изменяется во времени и зависит от внесенных удобрений.

Таблица 4

Динамика содержания подвижных соединений фосфора в почве, мг/кг

Вариант	1998 г.	1999–2003 гг.	2004–2008 гг.	2009–2013 гг.	2014–2018 гг.	2019–2023 гг. (прогноз)
1. Без удобрений (контроль)	101	100	98	78	76	65
2. Фон* + N ₈₁ K ₉₅ (п. д. фосфора)	154	140	124	96	85	77
3. Фон* + N ₈₆ (п. д. фосфора)	166	130	117	89	78	62
4. Фон* + N ₈₀ P ₃₇ K ₉₅	161	157	152	145	142	140

* Последствие навоза.

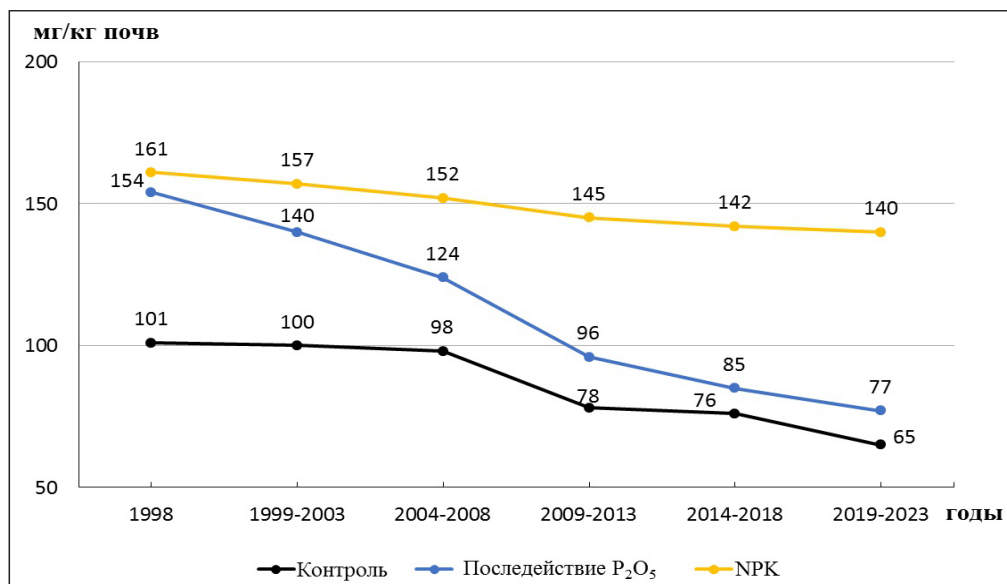


Рис. 1. Динамика содержания подвижных соединений фосфора в почве, мг/кг.

В варианте без внесения удобрений (контроль) содержание фосфатов в почве снизилось до исходного уровня (90 мг/кг почвы) через 10, а в вариантах 2, 3 (последствие фосфорных удобрений) – через 15 лет. При этом более интенсивное снижение содержания подвижного фосфора в почве отмечается в варианте с внесением только азотных удобрений. С течением времени – 20 и 25 (прогноз)

лет – последствия фосфорных удобрений содержание подвижного фосфора в почве снижается ниже исходного уровня, достигая 62–77 мг/кг почвы. Между временем последствий внесенных фосфорных удобрений и снижением содержания подвижных соединений фосфора в почве установлена тесная корреляционная связь, описываемая соответствующим уравнением регрессии (рис. 2):

$$Y = -16,5x + 170,5, R^2 = 0,97,$$

где y – содержание подвижных соединений фосфора в почве, мг/кг; x – количество годов после внесения фосфорных удобрений.

В то же время между динамикой изменения продуктивности культур (табл. 5, рис. 2), временем последствий фосфорных удобрений и содержанием подвижных форм фосфора в почве установлена слабая связь ($R^2 = 0,39$). Можно утверждать лишь о тенденции снижения продуктивности культур при возрастании времени последствий внесения фосфорных удобрений. Это подтверждает аксиому, что продуктивность культур – функция многих факторов и величина ее зависит не только от уровня содержания подвижного фосфора в почве.

Таблица 5

Динамика изменения продуктивности культур и содержания фосфатов в почве в последствии внесения фосфорных удобрений (вариант: фон + $N_{81}K_{95}$)

Показатель	1998 г.	1999–2003 гг.	2004–2008 гг.	2009–2013 гг.	2014–2018 гг.	2019–2023 гг. (прогноз)
Продуктивность, ц/га к. ед.	57,1	44,9	59,0	48,7	46,9	42
Содержание P_2O_5 , мг/кг почвы	154	140	124	96	85	77

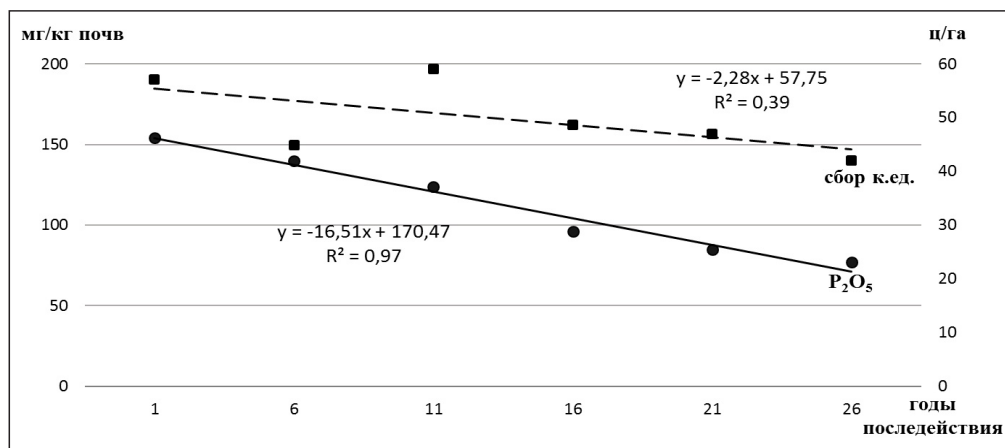


Рис. 2. Зависимость динамики изменения продуктивности культур и содержания фосфатов в почве от времени последствий внесенных фосфорных удобрений (вариант: фон + $N_{81}K_{95}$)

При внесении полного удобрения в дозах $N_{80}P_{37}K_{95}$ также отмечается снижение содержания подвижных соединений фосфора в почве, которое за 25 лет составило 21 мг/кг почвы, или около 1 мг/год. В то время как в варианте без внесения фосфорных удобрений оно составило 3, а при внесении только азотных –

4 мг/год, т.е. в три-четыре раза больше. Из приведенных данных в табл. 1 видно, что внесение фосфорных удобрений в дозе 60 кг/га P_2O_5 способствовало ежегодному накоплению в почве 4,5 мг/кг. Значит, для бездефицитного применения фосфорных удобрений их доза для получения продуктивности 60 ц/га к. ед. должна была составлять около 50 кг/га P_2O_5 .

Анализ приведенных в табл. 6 и на рис. 3, 4 данных показывает, что содержание подвижного калия в супесчаной почве по всем вариантам систем удобрения в условиях опыта снижается более динамично, чем содержание фосфатов. В варианте 2 (табл. 6) без внесения калийных удобрений уже через 5 лет содержание калия в почве снизилось на 68 мг/кг почвы, или на 30 % к исходному состоянию. Через 15 лет последствия калийных удобрений (варианты 2, 3) содержание калия в почве достигло уровня контроля, т. е. варианта, в котором не вносились удобрения почти 35 лет. Расчеты показывают, что без применения калийных удобрений содержание подвижного калия в почве стремительно снижается и через 25 лет последствия может приблизиться к состоянию, характерного для почв под естественной растительностью (лесом).

Таблица 6

Динамика содержания подвижных форм калия в почве, мг/кг

Вариант	1998 г.	1999–2003 гг.	2004–2008 гг.	2009–2013 гг.	2014–2018 гг.	2019–2023 гг. (прогноз)
1. Без удобрений (контроль)	148	116	85	69	62	41
2. Фон* + $N_{81}P_{42}$ (п. д. калия)	228	160	96	71	63	38
3. Фон* + $N_{86.1}$ (п. д. калия)	218	144	109	78	65	40
4. Фон* + $N_{80}P_{37}K_{95}$	207	196	153	139	120	71

* Последствие навоза.

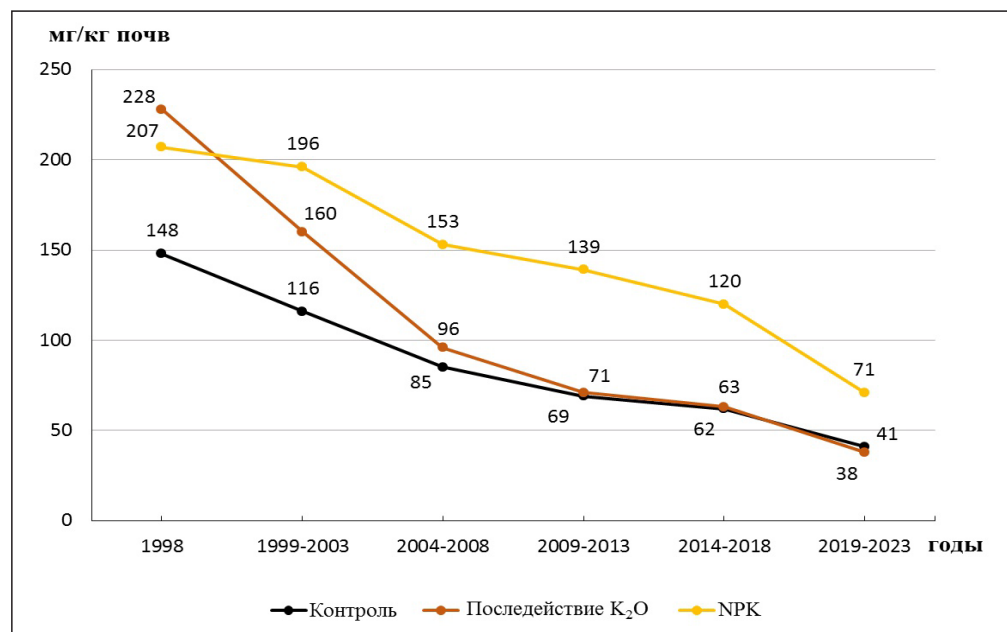


Рис. 3. Динамика содержания подвижных форм калия в почве, мг/кг

Между временем последействия внесенных калийных удобрений и снижением содержания подвижных соединений калия в почве установлена тесная корреляционная связь, описываемая соответствующим уравнением регрессии (рис. 4):

$$Y = -202,2 x^{-1,056}, R^2 = 0,99,$$

где y – содержание подвижных соединений калия в почве, мг/кг; x – количество годов после внесения калийных удобрений.

В то же время между динамикой изменения продуктивности культур (табл. 7, рис. 4), временем последействия калийных удобрений и содержанием подвижных соединений калия в почве связи не установлено ($R^2 = 0,25$). Можно утверждать лишь о тенденции снижения продуктивности культур при возрастании времени последействия внесения калийных удобрений. Это еще раз подтверждает аксиому, что продуктивность культур – функция многих факторов и величина ее зависит не только от уровня содержания подвижного калия в почве.

Таблица 7

Динамика изменения продуктивности культур и содержания K_2O в почве в последствии удобрений (вариант: фон + $N_{81}P_{42}$, последствие калия)

Показатель	1998 г.	1999–2003 гг.	2004–2008 гг.	2009–2013 гг.	2014–2018 гг.	2019–2023 гг. (прогноз)
Продуктивность, ц/га к. ед.	61,9	46,2	61,3	58,0	52,1	45,2
Содержание K_2O , мг/кг почвы	228	160	96	71	63	38

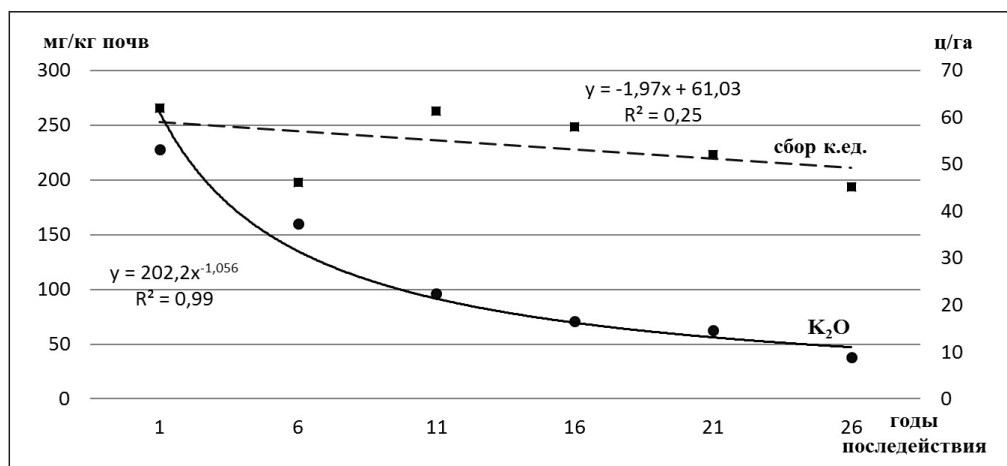


Рис. 4. Зависимость динамики изменения продуктивности культур и содержания K_2O в почве от времени последействия удобрений (вариант: фон + $N_{81}P_{42}$, последствие калия)

Исходя из представленных выше результатов исследований, следует отметить, что и при внесении во все годы полного удобрения (вариант: фон + $N_{80}P_{37}K_{95}$) через 10 лет содержание подвижного калия в почве снизилось на 54 мг/кг, или на 26 % к исходному (оптимальному) уровню. Расчеты показывают, что внесение

средней по севообороту дозы калийных удобрений (равной 95 кг/га K_2O) через 20 лет привело к снижению содержания подвижного калия в почве более чем в 2, а через 25 лет – в 3 раза (пройдя путь от оптимального – 207 до очень низкого уровня – 71 мг/кг почвы). Средние ежегодные потери подвижного калия в почве составляют более 5 мг/кг. В связи с чем напрашивается вывод, что для поддержания положительного баланса содержания калия в супесчаной почве и получения приведенной выше продуктивности сельскохозяйственных культур необходимо применять дозы калийных удобрений на уровне 120–130 кг/га д. в.

ВЫВОДЫ

1. При возделывании сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистой супесчаной почве без применения удобрений в течение 20 лет (1999–2018 гг.) среднегодовая продуктивность составила 32, 8 ц/га к. ед. при снижении содержания в почве подвижных форм фосфора на 40 (на 2 мг/кг ежегодно) и калия – на 86 (4,3 мг/кг ежегодно). От последствий применения органических удобрений полученная прибавка (+1,3–2,9 ц/га к. ед.) недостоверна. При внесении полного удобрения $N_{80}P_{37}K_{95}$ на фоне последствий навоза получена наиболее высокая средняя продуктивность исследуемых культур – 59,6 ц/га к. ед. Прибавка к фону от внесения удобрения составила 24,9 ц/га к. ед., или 82 % к контролю. Более низкие уровни прибавок получены от внесения парных комбинаций и азотных удобрений: $N_{81}P_{42}$ – 19,7; N_{86} – 16,1; $N_{81}K_{95}$ – 15,2 и $P_{42}K_{96}$ – 11,1 ц/га к. ед. Это значит, что дефицит азота приводит к снижению продуктивности сельскохозяйственных культур на 13,8; фосфора – на 9,7; суммы фосфора и калия – на 8,8 и калия – 5,2 ц/га к. ед.

2. Длительный дефицит того или иного элемента минерального питания в применяемых в опыте системах удобрения оказывает существенное влияние на агрохимическую деградацию и плодородие почв:

А) Динамика содержания в почве подвижных соединений фосфора, связанная с последствием внесенных ранее фосфорных удобрений, изменяется во времени и зависит от внесенных удобрений. В вариантах с последствием фосфорных удобрений содержание подвижного фосфора в почве снизилось до исходного уровня (90 мг/кг почвы) через 15, а через 20 и 25 (прогноз) лет опустится ниже исходного уровня и составит только 62–77 мг/кг почвы. Ежегодные потери подвижного фосфора составляют около 3 мг/кг почвы в год. Между временем последствия внесенных фосфорных удобрений и снижением содержания подвижных соединений фосфора в почве установлена тесная корреляционная связь, описываемая соответствующим уравнением регрессии:

$$Y = -16,5x + 170,5, R^2 = 0,97,$$

где y – содержание подвижных соединений фосфора в почве, мг/кг; x – количество годов после внесения фосфорных удобрений.

Б) Содержание подвижного калия в супесчаной почве по всем вариантам систем удобрения в условиях опыта снижается более динамично, чем содержание фосфатов. В варианте последствий калийных удобрений уже через 5 лет содержание калия в почве снизилось на 68 мг кг почвы, или на 30 % к исходному состоянию, а через 15 лет достигло уровня контроля, т. е. варианта, в котором

не вносились удобрения почти 35 лет. Через 20 лет последствий калийных удобрений содержание калия в почве снизилось на 165, а через 25 – до уровня целинного аналога. Средние ежегодные потери подвижного калия составили около 8 мг/кг почвы в год. Между временем последствий внесенных калийных удобрений и снижением содержания подвижных соединений калия в почве установлена тесная корреляционная связь, описываемая соответствующим уравнением регрессии:

$$Y = -202,2 x - 1,056, R^2 = 0,99,$$

где y – содержание подвижных соединений калия в почве, мг/кг; x – количество годов после внесения калийных удобрений.

3. Между динамикой изменения продуктивности культур и временем последствий фосфорных и калийных удобрений установлена слабая связь ($R^2 = 0,39$; $R^2 = 0,25$ соответственно). Это подтверждает аксиому, что продуктивность культур – функция многих факторов и величина ее зависит не только от уровня содержания подвижного фосфора или калия в почве.

4. При внесении полного удобрения в дозах $N_{80}P_{37}K_{95}$ также отмечается снижение содержания подвижных соединений фосфора и калия в почве: за 25 лет содержание P_2O_5 снизилось на 21 мг /кг почвы, или около 1 мг/год, а K_2O – на 136 и 5,5 мг /кг почвы соответственно. Для бездефицитного применения фосфорных и калийных удобрений их дозы для получения продуктивности 60 ц/га к. ед. должны составлять около 50 кг/га P_2O_5 и 120–130 кг/га K_2O .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулаковская, Т. Н. Почвенно-агрохимические основы получения высоких урожаев / Т. Н. Кулаковская. – Минск: Ураджай, 1978. – 328 с.
2. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь (2013–2016 гг.) / И. М. Богдевич [и др.]; под общ. ред. И. М. Богдевича: Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск: ИВЦ Минфина, 2017. – 275 с.
3. Семененко, Н. Н. Азот в земледелии Беларуси / Н. Н. Семененко, В. Н. Невмержицкий. – Минск: Бел. изд. Тов-во «Хата», 1997. – С.195.
4. Семененко, Н. Н. Адаптивные системы применения азотных удобрений / Н. Н. Семененко. – Минск: Бел. изд. Тов-во. «Хата», 2003. – 163 с.
5. Кудеяров, В. Н. Цикл азота в почве и эффективность удобрений / В. Н. Кудеяров. – М.: Наука, 1989. – 216 с.
6. Гамзиков, Г. П. Агрохимия азота в агроценозах / Г. П. Гамзиков. – Новосибирск, НГАУ, 2013. – 790 с.
7. Смирнов, П. М. Превращение азотных удобрений в почве и их использование растениями / П. М. Смирнов. – М.: ТСХА, 1982. – 62 с.
8. Сычев, В. Г. Влияние агрохимических свойств почв на эффективность минеральных удобрений / В. Г. Сычев, С. А. Шафран. – М.: ВНИИА, 2012. – 200 с.
9. Кирпичников, Н. А. Действие и последствие фосфорных удобрений на дерново-подзолистой почве при различной степени известкования / Н. А. Кирпичников, С. Н. Адрианов // Агрохимия, 2007. – № 10. – С. 14–23.
10. Ониани, О. Г. Агрохимия калия / О. Г. Ониани. – М.: Наука, 1981. – 200 с.

11. Изменение калийного состояния хорошо окультуренной почвы при применении калий-дефицитной системы удобрения / А. И. Иванов [и др.] // *Агрохимия*. – 2009. – № 4. – С. 21–26.
12. *Прокошев, В. В.* Агрохимия калийных удобрений: автореф. дис. ... д-ра биол. наук / В. В. Прокошев; МГУ. – М.: 1984. – 40 с.
13. *Прокошев, В. В.* О необходимости применения калийных удобрений / В. В. Прокошев // *Плодородие*. – 2002. – № 1. – С. 18 – 20.
14. *Якименко, В. Н.* Действие и последствие калийных удобрений в полевом опыте на серой лесной почве / В. Н. Якименко // *Агрохимия*. – 2015. – № 4. – С. 3–12.
15. Адаптивные системы земледелия в Беларуси / под общ. ред. А. А. Попкова. – Минск, 2001. – 308 с.
16. Современные ресурсосберегающие технологии производства растениеводческой продукции в Беларуси / Ф. И. Привалов [и др.]. – Минск: ИВЦ Минфина. – 2007. – 448 с.
17. Справочник агрохимика / В. В. Лапа [и др.]; под ред. В. В. Лапа. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 390 с.
18. Система применения органических и минеральных макро- и микроудобрений в севооборотах: рекомендации / В. В. Лапа [и др.]. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2012. – 56 с.
19. Организационно-технологические нормативы возделывания сельскохозяйственных культур: сб. отраслевых регламентов / В. Г. Гусаков и [и др.]. – Минск: Ин-т аграр. экономики, 2012. – 287 с.
20. Современные ресурсосберегающие технологии производства растениеводческой продукции в Беларуси: сборник научных материалов, 3-е изд., доп. и перераб. / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по земледелию. – Минск: ИВЦ Минфина, 2017. – 692 с.
21. *Доспехов, Б. А.* Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

DURATION OF AFTEREFFECT OF PHOSPHORIC AND POTASH FERTILIZERS ON CROP PRODUCTIVITY AND SOD-PODZOLIC SANDY LOAM SOIL'S FERTILITY

**V. V. Lapa, N. N. Semenenko, E. G. Mezentsseva,
N. N. Ivakhnenko, A. A. Hracheva**

Summary

The article presents the results of long-term research to assess the impact of fertilizer systems on crop productivity, the duration of aftereffect of phosphoric and potash fertilizers and fertility of sod-podzolic sandy loam soil.

It was found that a prolonged deficiency of one or another mineral nutrition's element affects the agrochemical degradation and soil fertility. Studies have shown that when phosphoric and potash fertilizers are excluded from the fertilizer system, annual losses of mobile phosphorus and potassium are about 3 and 8 mg/kg of soil per year, respectively.

Поступила 09.12.19