

УДК 631.81:631.559:631.417

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ АЗОТНЫХ, ФОСФОРНЫХ И КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР, БАЛАНС ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ

© 2025 г. М. Т. Васбиева^{1,*}, Д. Г. Шишков¹

¹Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства –
филиал Пермского федерального научного центра УрО РАН
614532, Пермский край, Пермский р-н, с. Лобаново, ул. Культуры, 12, Россия

*E-mail: vasbieva@mail.ru

Оценили эффективность использования азотных, фосфорных и калийных удобрений (N90, P90, K90, N90P90, N90K90, P90K90, N90P90K90, N30P30K30, N60P60K60, N120P120K120, N150P150K150) в длительном опыте (год закладки – 1978, Пермский НИИСХ) на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в полевом 8-польном севообороте. Установлено, что в климатических условиях Предуралья на озимой ржи и овсе наиболее эффективным (с учетом окупаемости 1 кг д.в. NPK 1 кг основной продукции) было применение N90, на картофеле – (NPK)30–60, яровой пшенице – N60P60K60, ячмене – N30P30K30. Достоверного влияния минеральных удобрений не выявлено на урожайность сена клевера лугового 1- и 2-го года пользования. Продуктивность севооборота в среднем за 5 ротаций увеличилась на 12–25% при применении N90, N90P90, N90K90, P90K90 и (NPK)30–150. Максимальная продуктивность получена в варианте N60P60K60 – 3.31 т з.е., наибольшая окупаемость – при внесении азотных удобрений N90 (8.9 кг з.е.). При этом длительное использование моноазотной системы удобрений привело к ухудшению показателей плодородия почвы. Применение суперфосфата и калия хлористого в чистом виде не оказало существенного влияния на продуктивность севооборота. Проведен расчет балансов органического углерода и элементов минерального питания. Положительный баланс углерода получен при использовании высоких доз N120P120K120 и N150P150K150 (+0.06–0.13 т/га/год), только в данных вариантах отмечено поддержание содержания $C_{орг}$ в слое (0–20 см) почвы на исходном уровне. Баланс азота, близкий к нулевому и положительный, сформировался при внесении азотных удобрений в дозе 90–150 кг д.в./га. Положительный баланс фосфора получен при внесении суперфосфата в дозе 60 кг д.в./га и больше. Нулевой и положительный баланс калия сложился при применении калия хлористого в дозе 120–150 кг д.в./га.

Ключевые слова: полевой севооборот, минеральные удобрения, продуктивность культур, баланс органического углерода, азота, фосфора, калия, дерново-подзолистая почва.

DOI: 10.31857/S0002188125020036, **EDN:** VBVOPM

ВВЕДЕНИЕ

Использование удобрений является одним из факторов, определяющих получение высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур. Эффективность применения удобрений, по данным разных авторов, варьирует в широких пределах и зависит от вида и/или системы удобрения, отзывчивости культур, севооборота, погодных условий, типа почвы, ее гранулометрического состава, содержания гумуса, обеспеченности основными элементами питания [1–3]. Исследование использования агрохимикатов в условиях длительных опытов дают более объективную оценку потребности в минеральных и органических удобрениях с учетом биологических

особенностей культур и применительно к конкретным почвенно-климатическим условиям для каждой зоны России [4, 5]. Для выявления эффективных уровней применения удобрений и направленного регулирования почвенного плодородия существенное значение имеет расчет баланса органического вещества и элементов минерального питания. Нарушение баланса питательных веществ в земледелии приводит к постепенному ухудшению плодородия почвы и уменьшению урожайности культур [4, 6]. В зависимости от поставленной цели – получения максимальной урожайности, экономической эффективности или сохранения плодородия почвы, земельного фонда как национального достояния

страны — выбор системы удобрения будет существенно отличаться.

Цель работы — в климатических условиях Предуралья оценка влияния длительного применения азотных, фосфорных, калийных удобрений и их сочетания на продуктивность сельскохозяйственных культур и определение баланса углерода и элементов питания за 5 ротаций севооборота.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в длительном полевом опыте “Изучение влияния доз и соотношений минеральных удобрений на урожай и качество полевых культур”, заложенном в 1978 г. на базе опытного поля Пермского НИИСХ — филиала ПФИЦ УрО РАН. Полевой опыт заложен по неполной факториальной схеме $1/9(6 \times 6 \times 6)$, которая включала 24 варианта. Для исследования были выбраны следующие варианты: 1 — без удобрений (контроль), 2 — N90, 3 — P90, 4 — K90, 5 — N90P90, 6 — N90K90, 7 — P90K90, 8 — N90P90K90, 9 — N30P30K30, 10 — N60P60K60, 11 — N120P120K120, 12 — N150P150K150. Опыт заложен в 2-х последовательных во времени закладках (1978, 1980 г.). Общая площадь делянки — 120 м². Исследования проводили в полевом 8-польном парозернопропашном севообороте со следующим чередованием культур: чистый пар—озимая рожь—картофель—яровая пшеница с подсевом клевера—клевер 1-го года пользования (г.п.)—клевер 2-го г.п.—ячмень—овес. Формы удобрений — аммиачная селитра или мочевины, двойной или простой суперфосфат, калий хлористый. Минеральные удобрения под яровые зерновые и картофель вносили весной перед посевом, под озимую рожь дробно — осенью и весной в подкормку. Солому в опыте после уборки до 2013 г. отчуждали. Перед закладкой опыта проводили известкование (по 1.0 Н_г). Агротехника в опытах — общепринятая для Пермского края. Сорта полевых культур — районированные, семена высших репродукций.

Опытный участок расположен на дерново-слабоподзолистой тяжелосуглинистой почве с содержанием С_{орг} в среднем в 2-х закладках — 1.24%, рН_{KCl} 5.6 ед., Н_г — 2.0 смоль(экв)/кг, S — 21.0 смоль(экв)/кг, содержанием подвижного Р₂О₅ и К₂О (по Кирсанову) — 175 и 203 мг/кг соответственно.

Исследование проводили в IV агроклиматическом районе Пермского края. Климат умеренно-континентальный с холодной, продолжительной, снежной зимой и теплым коротким летом. Длительность периода активной вегетации с температурой >10 °С — в среднем 115 сут, с температурой >15 °С — 60 сут. Район относится к зоне достаточного увлажнения: осадков за год выпадает 470–500 мм, испаряемость с поверхности почвы составляет ≈340 мм [7, 8]. За время проведения исследования в опыте (1978–2019 гг.)

на избыточно увлажненные годы (ГТК >1.3) пришлось ≈50%, годы с нормальным увлажнением (ГТК = 1.0–1.3) — 35% и засушливые годы (ГТК <1.0) — 15%. Сумма средних суточных активных температур >10 °С варьировала от 1223 (1992 г.) до 2065 °С (2016 г.). Период исследования охватывал как благоприятные, так и экстремальные по количеству тепла и влаги годы. Влияние погодных условий зависело от вида культуры, сорта и соблюдения агротехнологий возделывания культур в севообороте.

Расчет баланса органического углерода проводили по методике, предложенной А.М. Лыковым (1979). Поступление биологического азота с клевером рассчитывали как 2/3 от выноса культурой. Коэффициенты использования элементов питания из удобрений рассчитывали разностным способом. Статистическую обработку результатов исследований проводили с использованием программы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ изменения урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от примененных удобрений показал, что в среднем за 5 ротаций для озимой ржи наиболее эффективным было применение азотных удобрений N90: получена прибавка зерна 0.5 т/га, что больше контрольного варианта на 16%, окупаемость 1 кг NPK зерном составила 5.6 кг (табл. 1).

Также достоверные прибавки (0.3–0.5 т/га) были получены при одностороннем внесении калия хлористого, двойном и тройном сочетании элементов питания, при этом окупаемость была меньше — 1.1–4.4 кг. Применение суперфосфата не оказало существенного влияния на урожайность озимой ржи.

На картофеле наиболее эффективным было применение полного минерального удобрения. Наибольшая урожайность клубней получена при внесении максимальной дозы N150P150K150 — 25.4 т/га, прибавка составила 9.0 т/га (55%). Однако с учетом окупаемости 1 кг NPK основной продукцией выделились варианты N60P60K60, где прибавка составила 7.0 т/га (43%), окупаемость — 38.9 кг клубней картофеля, и вариант N30P30K30, где прибавка составила 4.3 т/га (26%), окупаемость — 47.8 кг клубней картофеля. Результаты исследования показали, что в среднем за 5 ротаций на картофеле было не эффективно применение калия хлористого, суперфосфата в чистом виде и их сочетания, хотя в отдельные ротации наблюдали увеличение урожайности культуры в данных вариантах на 25–63%.

Наиболее эффективным применение полного минерального удобрения было и на яровой пшенице. Выделился вариант N60P60K60. В этом случае получена прибавка 0.9 т/га (56%), окупаемость составила 5.0 кг. Наибольшая окупаемость получена

Таблица 1. Урожайность полевых культур и окупаемость применения удобрений (среднее для 2-х закладок, 1978–2019 гг.)

Вариант	Озимая рожь (зерно)		Картофель (клубни)		Яровая пшеница (зерно)		Клевер 1-го г.п. (сено 16%)		Клевер 2-го г.п. (сено 16%)		Ячмень (зерно)		Овес (зерно)	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Без удобрений	3.2	—	16.4	—	1.6	—	4.3	—	3.8	—	2.7	—	3.1	—
N90	3.7	5.6	20.0	40.0	2.1	5.6	4.1	–2.2	4.2	4.4	3.1	4.4	3.7	6.7
P90	3.3	1.1	18.5	23.3	1.7	1.1	3.7	–6.7	4.0	2.2	3.1	4.4	2.9	–2.2
K90	3.6	4.4	18.0	17.8	1.8	2.2	4.4	1.1	3.9	2.2	2.9	3.3	2.9	–2.2
N90P90	3.5	1.7	21.7	30.0	2.1	2.8	3.3	–5.6	3.7	–0.6	2.8	1.1	3.5	2.2
N90K90	3.7	2.8	22.4	33.3	2.1	2.8	4.2	–0.6	3.8	0.0	3.0	1.7	3.4	1.1
P90K90	3.6	2.2	19.0	14.4	1.8	1.1	5.0	3.9	3.9	0.6	3.2	3.3	3.0	–0.6
N90P90K90	3.6	1.5	22.8	23.7	2.5	3.3	4.0	–1.1	3.3	–1.5	3.2	1.9	3.6	1.9
N30P30K30	3.6	4.4	20.7	47.8	2.1	4.4	3.4	–10.0	3.7	–1.1	3.2	6.7	3.3	2.2
N60P60K60	3.7	2.8	23.4	38.9	2.6	5.0	4.0	–1.7	4.3	2.8	3.3	3.9	3.6	2.8
N120P120K120	3.7	1.4	23.7	20.3	2.4	2.2	3.3	–2.8	3.7	–0.3	3.3	1.7	3.4	0.8
N150P150K150	3.7	1.1	25.4	20.0	2.5	2.0	3.2	–2.7	3.7	0.0	3.3	1.6	3.4	0.4
HCP ₀₅	0.3	—	2.7	—	0.3	—	$F_{\phi} < F_T$	—	$F_{\phi} < F_T$	—	0.4	—	0.5	—

Примечание. В графе 1 — урожайность, т/га, 2 — окупаемость 1 кг д.в. NPK основной продукцией, кг.

при внесении азотных удобрений N90 — 5.6 кг, однако прибавка зерна составила 0.5 т/га. Так же как и на картофеле, на пшенице было не эффективно применение суперфосфата и калия хлористого или их сочетания.

Достоверного влияния минеральных удобрений не выявлено на урожайность сена клевера лугового 1- и 2-го года пользования.

По влиянию на урожайность ярового ячменя выделился вариант N30P30K30. Прибавка составила 0.6 т/га (21%), окупаемость 1 кг NPK зерном — 6.7 кг. На данной культуре было неэффективно применение калия хлористого, азотно-калийных и азотно-фосфорных удобрений. Внесение суперфосфата P90 по влиянию на урожайность ячменя не уступало азотному удобрению N90 — в обоих вариантах получена прибавка 0.4 т/га, окупаемость 4.4 кг.

Установлено, что на овсе было эффективно одностороннее применение азотного удобрения N90. В среднем за 5 ротаций в данном варианте получена максимальная прибавка в опыте 0.6 т/га (34%) и окупаемость — 6.7 кг. Достоверное увеличение урожайности отмечено также при внесении N60P60K60 и N90P90K90, прибавка составила 0.5 т/га. В остальных вариантах изменения урожайности культуры находились в пределах ошибки опыта.

Продуктивность севооборота в среднем за 5 ротаций увеличилась на 12–25% при внесении азотных

удобрений N90, сочетании N90P90, N90K90, P90K90 и (NPK)30–150 (табл. 2).

В длительном полевом опыте, проведенном в западной части Нечерноземной зоны России (Смоленская обл.), на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при сравнительном изучении действия минеральных и органических удобрений в различных дозах и сочетаниях (N, P, K, NPK, навоз, NPK + навоз) выявлена их эффективность во всех исследованных вариантах, кроме одностороннего внесения фосфорных удобрений [9]. Эффективность применения калийных удобрений в чистом виде на данных почвах была обусловлена низким содержанием доступных форм калия.

По результатам наших исследований максимальная продуктивность полевого 8-польного севооборота была получена в варианте N60P60K60 — 3.31 т з.е., наибольшая окупаемость — при внесении азотных удобрений в чистом виде N90, оплата 1 кг д.в. составила 8.9 кг з.е. Однако длительное использование азотных удобрений N90 привело к деградации плодородия почвы [10]. Отмечено уменьшение содержания органического углерода в слое почвы 0–60 см — запасы в 1-метровом слое уменьшились почти на 30%. В слое 0–60 см наблюдали подкисление почвы. Установлено достоверное уменьшение содержания подвижных соединений фосфора в подпахотном слое и подвижных соединений калия в слое 0–40 см — запасы уменьшились на 10–20%.

Таблица 2. Влияние длительного применения минеральных удобрений на продуктивность полевого 8-польного севооборота (среднее для 2-х закладок, 1978–2019 гг.)

Вариант	Ротации					Среднее за 5 ротаций	Прибавка	Окупаемость 1 кг д.в. NPK, кг з.е.
	1-я	2-я	3-я	4-я	5-я			
	т з.е./год							
Без удобрений	2.66	2.76	2.38	2.84	2.62	2.65	—	—
N90	3.40	3.55	2.73	3.10	2.97	3.15	0.50	8.9
P90	2.90	3.03	2.35	2.77	2.77	2.76	0.11	2.0
K90	3.08	2.94	2.55	2.70	2.85	2.82	0.17	3.0
N90P90	3.41	3.03	2.67	3.04	2.93	3.02	0.37	3.3
N90K90	3.33	3.33	2.75	3.19	2.98	3.11	0.46	4.1
P90K90	3.39	3.11	2.53	2.88	2.97	2.97	0.32	2.8
N90P90K90	3.40	3.43	2.83	3.18	3.31	3.23	0.58	3.4
N30P30K30	3.28	3.33	2.71	2.93	2.78	3.01	0.35	6.2
N60P60K60	3.33	3.66	3.02	3.28	3.26	3.31	0.66	5.9
N120P120K120	3.34	3.22	2.81	3.26	3.28	3.18	0.53	2.4
N150P150K150	3.36	3.28	2.83	3.45	3.36	3.26	0.60	2.1
НСП ₀₅	—	—	—	—	—	—	0.17	—

Примечание. Применение суперфосфата и калия хлористого в чистом виде не оказало заметного влияния на продуктивность севооборота — отмечено увеличение на 5–6%, в пределах случайной ошибки опыта.

В работах [11, 12] допустили краткосрочное применение моноазотной системы удобрения на высоко- окультуренных дерново-подзолистых почвах (в течение 5 лет), при этом также отмечено, что длительное ее применение неизбежно ведет к снижению плодородия. В работе [12] считают, что для сохранения плодородия дерново-подзолистых почв экологически наиболее целесообразно внесение полного минерального удобрения с минимальными дозами фосфора и калия — P15K30. По данным [13], умеренные дозы NPK и органических удобрений позволяют получать в тайге и подтайге до 30–36 ц з.е. с 1 га севооборотной площади, в лесостепи — 29–34 ц з.е./га,

в степи — 16–25 ц з.е./га при окупаемости 1 кг д.в. удобрений от 9 до 14 кг зерна. При этом систематическое применение умеренных доз удобрений не создает экологических проблем в агроценозах. В работе [14] показано, что по сравнению с несбалансированным внесением минеральных удобрений в виде NP или NK эффективность полного минерального удобрения в меньшей степени подвержена отрицательному влиянию засухи.

Расчет баланса углерода показал, что минерализация органического вещества в почве контрольного варианта

Таблица 3. Баланс органического углерода в полевом 8-польном севообороте, т/га (среднее для 2-х закладок, 1978–2019 гг.)

Вариант	Приход	Расход	Баланс	
			за ротацию	в год
Без удобрений		3.0	–1.1	–0.14
N90	1.9	2.1	–0.2	–0.03
P90	1.9	3.1	–1.2	–0.15
K90	1.9	3.4	–1.5	–0.19
N90P90	1.9	2.0	–0.1	–0.01
N90K90	1.9	2.0	–0.1	–0.01
P90K90	1.9	3.5	–1.6	–0.20
N90P90K90	2.0	2.2	–0.2	–0.02
N30P30K30	1.9	3.2	–1.3	–0.16
N60P60K60	2.0	2.7	–0.7	–0.09
N120P120K120	2.0	1.5	0.5	0.06
N150P150K150	2.0	1.0	1.0	0.13

опыта превысила процессы гумификации в 1.6 раза, баланс углерода составил –140 кг/га/год (табл. 3).

Среднегодовой вынос элементов питания урожаем сельскохозяйственных культур в варианте без удобрений составил: азота и калия – ≈65, фосфора – 25 кг/га (табл. 4–6). Экстенсивное возделывание сельскохозяйственных культур в полевом севообороте в течение 40 лет привело к потере из почвы 5.5 т органического углерода, ≈2.5 т азота и калия, 1.0 т фосфора.

Баланс углерода в вариантах с дозой азотных удобрений 90 кг д.в./га (N90, N90P90, N90K90 и N90P90K90) составил –0.01...–0.03 т/га/год, при использовании более высоких доз 120 и 150 кг д.в./га (N120P120K120, N150P150K150) – +0.06–0.13 т/га/год. Сохранение содержания в почве органического углерода на исходном уровне также наблюдали в вариантах N120P120K120, N150P150K150 [10, 15].

Внесение N90 увеличило среднегодовой вынос N, P₂O₅ и K₂O на 30, 8 и 14% соответственно.

Таблица 4. Баланс азота в полевом 8-польном севообороте, кг/га (за 5 ротаций, 1978–2019 гг., среднее для 2-х закладок)

Вариант	Поступление азота* в сумме за 5 ротаций	Хозяйственный вынос азота в сумме за 5 ротаций	Баланс +/–		Интенсивность баланса	Коэффициент использования азота из удобрений
			всего	в среднем в год		
кг/га					%	
Без удобрений	840	2552	–1712	–43	33	–
N90	3140	3312	–172	–4	95	33
P90	760	2508	–1748	–44	30	–
K90	920	2848	–1928	–48	32	–
N90P90	3025	3118	–93	–2	97	26
N90K90	3090	3173	–83	–2	97	28
P90K90	915	2898	–1983	–50	32	–
N90P90K90	3045	3219	–174	–4	95	30
N30P30K30	1505	2940	–1435	–36	51	58
N60P60K60	2345	3194	–849	–21	73	43
N120P120K120	3730	3186	544	14	117	22
N150P150K150	4480	3310	1170	29	135	21

* С удобрениями, семенами и клевером.

Таблица 5. Баланс фосфора в полевом 8-польном севообороте, кг/га (за 5 ротаций, 1978–2019 гг., среднее для 2-х закладок)

Вариант	Поступление фосфора* в сумме за 5 ротаций	Хозяйственный вынос фосфора в сумме за 5 ротаций	Баланс +/–		Интенсивность баланса	Коэффициент использования фосфора из удобрений
			всего	в среднем в год		
кг/га					%	
Без удобрений	60	970	–910	–23	6	–
N90	60	1050	–990	–25	6	–
P90	2310	945	1365	34	244	0
K90	60	978	–918	–23	6	
N90P90	2310	1030	1280	32	224	3
N90K90	60	1015	–955	–24	6	

Окончание таблицы 5

Вариант	Поступление фосфора* в сумме за 5 ротаций	Хозяйственный вынос фосфора в сумме за 5 ротаций	Баланс +/–		Интенсивность баланса	Коэффициент использования фосфора из удобрений
			всего	в среднем в год		
кг/га					%	
P90K90	2310	1040	1270	32	222	3
N90P90K90	2310	1140	1170	29	203	8
N30P30K30	810	1025	–215	–5	79	7
N60P60K60	1560	1140	420	11	137	11
N120P120K120	3060	1070	1990	50	286	3
N150P150K150	3810	1150	2660	67	331	5

*С удобрениями и семенами. То же в табл. 6.

Таблица 6. Баланс калия в полевом 8-польном севообороте, кг/га (за 5 ротаций, 1978–2019 гг., среднее для 2-х закладок)

Вариант	Поступление калия* в сумме за 5 ротаций	Хозяйственный вынос калия в сумме за 5 ротаций	Баланс +/–		Интенсивность баланса	Коэффициент использования калия из удобрений
			всего	в среднем в год		
кг/га					%	
Без удобрений	130	2570	–2440	–61	5	–
N90	130	2897	–2767	–69	4	–
P90	130	2587	–2457	–61	5	–
K90	2380	2853	–473	–12	83	13
N90P90	130	2857	–2727	–68	5	–
N90K90	2380	3290	–910	–23	72	32
P90K90	2380	2976	–596	–15	80	18
N90P90K90	2380	3327	–947	–24	72	34
N30P30K30	880	3203	–2323	–58	27	84
N60P60K60	1630	3479	–1849	–46	47	61
N120P120K120	3130	3072	58	1	102	17
N150P150K150	3880	3207	673	17	121	17

Применение суперфосфата P90 не оказало существенного влияния на вынос элементов питания, а внесение калия хлористого K90 увеличило вынос азота и калия на 11–12%. Сочетание азотно-фосфорных удобрений, азотно-калийных и фосфорно-калийных удобрений увеличило среднегодовой вынос N и K₂O на 11–28, P₂O₅ – на 5–7%. Среднегодовой вынос азота был больше в вариантах с азотными удобрениями N90P90 и N90K90, а калия – в вариантах с калийными удобрениями N90K90 и P90K90. Применение полного минерального удобрения N90P90K90 увеличило среднегодовой вынос азота

и калия на 25–30, фосфора – на 20%. Во всех вариантах в большей степени наблюдали увеличение потребления азота и калия, в меньшей – фосфора. Максимально вынос N увеличился в вариантах N90 и N150P150K150 (на 30%), P₂O₅ – в вариантах (NPK)60–150 (почти на 20%) и K₂O – в варианте N60P60K60 (на 35%).

Расчет хозяйственного выноса на 1 т основной продукции показал, что вынос элементов питания зависел от сельскохозяйственной культуры, вида удобрений, их сочетания и дозы (табл. 7).

Таблица 7. Хозяйственный вынос элементов питания сельскохозяйственными культурами 1 т основной продукции, кг (среднее для 2-х закладок за 5 ротаций севооборота)

Вариант	Озимая рожь (зерно)			Картофель (клубни)			Пшеница (зерно)			Клевер 1 г.п. (сено 16%)			Клевер 2 г.п. (сено 16%)			Ячмень (зерно)			Овес (зерно)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Без удобрений	24 ± 2	10 ± 1	26 ± 3	2.7 ± 0.5	1.0 ± 0.3	6.1 ± 1.3	34 ± 4	11 ± 2	25 ± 5	27 ± 4	7 ± 1	32 ± 4	27 ± 6	6 ± 2	29 ± 7	27 ± 4	12 ± 3	23 ± 5	24 ± 2	14 ± 3	37 ± 8
N90	31 ± 3	9 ± 1	34 ± 7	3.5 ± 0.6	0.9 ± 0.2	5.6 ± 0.9	35 ± 3	12 ± 2	23 ± 4	28 ± 4	7 ± 1	31 ± 5	28 ± 7	6 ± 2	29 ± 7	30 ± 5	11 ± 2	26 ± 5	30 ± 5	12 ± 2	37 ± 10
P90	26 ± 2	10 ± 1	32 ± 3	2.6 ± 0.4	1.0 ± 0.2	6.1 ± 1.2	35 ± 2	11 ± 1	19 ± 4	25 ± 2	6 ± 1	30 ± 5	26 ± 5	5 ± 1	31 ± 7	25 ± 4	11 ± 2	25 ± 5	22 ± 2	13 ± 2	33 ± 6
K90	28 ± 4	9 ± 2	28 ± 5	2.7 ± 0.4	0.9 ± 0.2	6.5 ± 1.0	34 ± 4	12 ± 2	22 ± 4	28 ± 3	7 ± 1	38 ± 5	26 ± 6	6 ± 1	32 ± 8	28 ± 6	11 ± 1	24 ± 5	22 ± 3	13 ± 2	32 ± 6
N90P90	34 ± 8	10 ± 1	43 ± 14	3.2 ± 0.5	0.9 ± 0.2	5.4 ± 0.9	40 ± 4	11 ± 2	25 ± 5	28 ± 2	7 ± 1	33 ± 9	28 ± 6	6 ± 1	26 ± 6	32 ± 4	12 ± 2	28 ± 5	28 ± 4	13 ± 2	39 ± 6
N90K90	33 ± 4	9 ± 2	41 ± 7	2.9 ± 0.5	0.8 ± 0.2	6.2 ± 1.0	36 ± 6	11 ± 2	23 ± 5	27 ± 2	7 ± 1	38 ± 6	26 ± 6	5 ± 1	34 ± 8	32 ± 5	11 ± 2	29 ± 3	30 ± 5	12 ± 1	39 ± 8
P90K90	29 ± 4	10 ± 1	30 ± 4	2.4 ± 0.4	0.9 ± 0.2	5.8 ± 1.1	37 ± 4	11 ± 2	31 ± 8	27 ± 3	7 ± 1	36 ± 6	27 ± 6	6 ± 1	34 ± 8	29 ± 7	11 ± 1	26 ± 5	23 ± 3	13 ± 3	34 ± 10
N90P90K90	31 ± 3	11 ± 1	35 ± 6	3.2 ± 0.5	0.8 ± 0.2	6.1 ± 1.2	39 ± 4	10 ± 2	25 ± 4	26 ± 2	7 ± 1	37 ± 4	27 ± 6	6 ± 1	32 ± 8	31 ± 4	13 ± 2	29 ± 6	28 ± 4	13 ± 2	41 ± 7
N30P30K30	31 ± 4	10 ± 1	34 ± 7	2.8 ± 0.5	0.9 ± 0.2	6.0 ± 1.1	38 ± 3	12 ± 2	24 ± 6	26 ± 2	7 ± 1	32 ± 5	26 ± 6	6 ± 1	31 ± 8	30 ± 6	13 ± 2	27 ± 7	29 ± 3	12 ± 2	45 ± 10
N60P60K60	26 ± 2	9 ± 2	34 ± 5	2.7 ± 0.4	0.9 ± 0.2	6.1 ± 1.0	35 ± 4	11 ± 1	21 ± 4	27 ± 3	7 ± 1	36 ± 4	25 ± 6	6 ± 1	31 ± 7	26 ± 5	12 ± 2	24 ± 5	30 ± 5	12 ± 2	34 ± 6
N120P120K120	33 ± 3	10 ± 1	34 ± 4	3.1 ± 0.6	0.8 ± 0.2	6.0 ± 1.0	37 ± 5	11 ± 2	25 ± 8	27 ± 2	7 ± 1	35 ± 5	25 ± 5	6 ± 1	30 ± 7	30 ± 5	12 ± 3	23 ± 4	31 ± 3	12 ± 2	37 ± 4
N150P150K150	35 ± 6	12 ± 2	43 ± 7	3.1 ± 0.6	0.9 ± 0.3	6.0 ± 1.0	41 ± 4	13 ± 2	28 ± 6	28 ± 2	8 ± 1	38 ± 5	26 ± 6	6 ± 1	33 ± 8	32 ± 5	12 ± 2	29 ± 7	30 ± 4	13 ± 2	35 ± 7

Внесение азотных удобрений в чистом виде (N90) способствовало увеличению хозяйственного выноса N и K_2O 1 т зерна озимой ржи и ячменя, только N 1 т зерна яровой пшеницы, овса и клубней картофеля. На картофеле и пшенице прослежены тенденции к уменьшению хозяйственного выноса K_2O . Применение фосфорных удобрений в чистом виде (P90) привело к увеличению хозяйственного выноса N и K_2O 1 т зерна озимой ржи, уменьшению выноса N и/или K_2O другими культурами севооборота, за исключением картофеля. Внесение суперфосфата не привело к росту хозяйственного выноса P_2O_5 , на некоторых культурах наблюдали тенденции к уменьшению потребления фосфора растениями. Внесение калия хлористого в чистом виде (K90) способствовало увеличению хозяйственного выноса K_2O 1 т основной продукцией картофеля и клевера лугового, уменьшению – яровой пшеницы и овса. Использование азотно-фосфорных удобрений N90P90 привело к увеличению хозяйственного выноса N и K_2O 1 т зерна озимой ржи, ячменя и овса, хозяйственного выноса N 1 т основной продукции картофеля и пшеницы. Отмечено уменьшение хозяйственного выноса K_2O картофелем и клевером луговым. Внесение азотно-калийных удобрений N90K90 способствовало увеличению хозяйственного выноса N и K_2O 1 т зерна озимой ржи, ячменя и овса, хозяйственного выноса K_2O 1 т сена клевера лугового. Применение фосфорно-калийных удобрений привело к увеличению хозяйственного выноса N и K_2O 1 т зерна озимой ржи и яровой пшеницы, хозяйственного выноса K_2O клевером луговым. Для картофеля отмечены тенденции к уменьшению хозяйственного выноса N. Внесение полного минерального удобрения N90P90K90 способствовало увеличению хозяйственного выноса N и K_2O 1 т зерна озимой ржи, ячменя и овса, хозяйственного выноса N 1 т клубней картофеля и 1 т зерна пшеницы, хозяйственного выноса K_2O 1 т сена клевера лугового.

Рассмотрение возрастающих доз полного минерального удобрения от 30 до 150 кг д.в./га показало, что в варианте N60P60K60, где была получена максимальная продуктивность севооборота, наблюдали минимальные показатели хозяйственного выноса N 1 т зерна озимой ржи, яровой пшеницы, ячменя и картофеля. Возможно, для получения более качественной продукции необходимо использование более высоких доз NPK.

Близкий к нулевому и положительный баланс азота с учетом в севообороте 2-х полей клевера сложился при внесении азотных удобрений в дозе 90 кг д.в./га и больше – N90, N90P90, N90K90, (NPK)90–150. Интенсивность баланса составила 95–135%. В вариантах, где азотные удобрения не вносили, получен отрицательный баланс азота (–45–50 кг/год), компенсация выноса за счет клевера составила ≈30%. Положительный баланс фосфора в почве получен при

внесении суперфосфата в дозе 60 кг д.в./га и больше. Близкий к нулевому и положительный баланс калия сложился при применении калия хлористого в дозе 120–150 кг д.в./га, интенсивность баланса составила 102–121%. При внесении более низких доз калийного удобрения (K90, P90K90, N90K90, (NPK)30–90) компенсация выноса составила 27–83%.

Наиболее высокий коэффициент использования из удобрений (КИУ) азота и калия получен при внесении N30P30K30. В среднем за 5 ротаций он составил 58 и 84% соответственно. Наблюдали снижение КИУ элементов питания при увеличении их доз, что также отмечено в работах [16, 17]. КИУ фосфора во всех вариантах с суперфосфатом был низким и варьировал от 3 до 11%. Более высокие КИУ растениями азота и калия связаны с хорошей растворимостью данных видов удобрений в воде [18].

Полученные результаты по изменению содержания в почве органического углерода и элементов питания [10, 15] не всегда согласовывались с рассчитанными балансами элементов питания, что возможно было связано с влиянием подкисления почвы на трансформацию труднодоступных форм азота, фосфора и калия в более подвижные, а также потреблением элементов питания из нижележащих слоев почвы.

ВЫВОДЫ

Выявлено, что на дерново-подзолистой почве в климатических условиях Предуралья на озимой ржи и овсе наиболее эффективным (с учетом окупаемости 1 кг д.в. NPK 1 кг основной продукции) было применение N90, на картофеле – (NPK)30–60, яровой пшенице – N60P60K60, ячмене – N30P30K30. Максимальная продуктивность севооборота в среднем за 5 ротаций получена в варианте N60P60K60, а наибольшая окупаемость – при внесении азотных удобрений в чистом виде N90, оплата 1 кг д.в. составила 8.9 кг з.е.

Возделывание сельскохозяйственных культур в полевом севообороте в течение 40 лет без применения удобрений привело к потере из почвы 5.5 т органического углерода, ≈2.5 т азота и калия, 1.0 т фосфора. Изучение действия азотных, фосфорных, калийных удобрений, их соотношения и доз показало, что в полевом 8-польном севообороте баланс азота, близкий к нулевому, сформировался при внесении азотных удобрений в дозе 90 кг д.в./га, положительный – при дозе 120–150 кг д.в./га. Положительный баланс фосфора получен при внесении суперфосфата в дозе 60 кг д.в./га и больше. Нулевой и положительный баланс калия сложился при применении калия хлористого в дозе 120–150 кг д.в./га. Положительный баланс углерода был получен при использовании высоких доз (NPK)120–150 (+0.06–0.13 т/га/год).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуян О.Г., Глазунов Г.П., Караулова Л.Н., Митрохина О.А., Афонченко Н.В., Золотухин А.Н., Двойных В.В. Оценка роли климатических, почвенных и агротехнических факторов в формировании ресурсов продуктивности агроландшафтов Центрального Черноземья // Метеорол. и гидрол. 2022. № 6. С. 79–87.
DOI: 10.52002/0130-2906-2022-6-79-87
2. Лукин С.М., Золкина Е.И., Марчук Е.В. Влияние длительного применения удобрений на продуктивность севооборота, содержание и качественный состав органического вещества почвы // Плодородие. 2021. № 3(120). С. 93–98.
DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.18
3. Окорков В.В., Шукин И.М., Окоркова Л.А., Шукина В.И., Козлов А.А. Изменение содержания подвижных форм азота в серых лесных почвах ополья под влиянием ландшафтных особенностей агротехнологий // Агрохимия. 2023. № 1. С. 13–24.
DOI: 10.31857/S0002188123010088
4. Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // Агрохимия. 2020. № 6. С. 3–13.
DOI: 10.31857/S0002188120060125
5. Постников П.А., Попова В.В., Данько Е.Ф., Васина О.В. Урожайность культур, вынос и баланс элементов питания в зернотравяном севообороте // Плодородие. 2022. № 3(126). С. 16–19.
DOI: 10.25680/S19948603.2022.126.04
6. Сычев В.Г. Основные ресурсы урожайности сельскохозяйственных культур и их взаимосвязь. М.: ЦИНАО, 2003. 228 с.
7. Агроклиматические ресурсы Пермской области / Под ред. Е.В. Григорчук. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 156 с.
8. Еремченко О.З., Шестаков И.Е., Москвина Н.В. Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2016. 252 с.
9. Мерзлая Г.Е. Исследование устойчивости агроценозов при длительном применении удобрений на дерново-подзолистой почве // Почвоведение. 2021. № 3. С. 355–362.
DOI: 10.31857/S0032180X21030126
10. Vasbieva M.T., Zavyalova N.E., Shishkov D.G. Changes in the agrochemical properties of albic retisol (Abruptic, Aric, Loamic) during a long-term use of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers under Cis-Ural // Eur. Soil Sci. 2022. V. 55. № 11. P. 1623–1632.
DOI: 10.1134/S1064229322110138
11. Иванов А.И., Иванова Ж.А., Воробьев В.А., Цыганова Н.А. Агроэкологические последствия длительного применения дефицитных систем удобрения на хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. 2016. № 4. С. 10–17.
12. Лапа В.В., Кулеш О.Г. Роль уровня почвенной кислотности и условий питания в изменении агрохимических свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы // Почвовед. и агрохим. 2015. № 1(54). С. 140–150.
13. Гамзиков Г.П. Состояние и перспективы исследований в длительных стационарных опытах с удобрениями в Сибири // Плодородие. 2016. № 5(92). С. 6–9.
14. Лукин С.М., Мерзлая Г.Е. Сравнительная эффективность различных систем удобрения при длительном их применении в севооборотах // Плодородие. 2016. № 5(92). С. 42–47.
15. Завьялова Н.Е., Васбиева М.Т., Шишков Д.Г., Казакова И.В. Агрохимические показатели, содержание и запасы подвижных и необменных форм калия в профиле пахотной дерново-подзолистой почвы длительного опыта при внесении возрастающих доз NPK // Рос. сел.-хоз. наука. 2022. № 5. С. 54–59.
DOI: 10.31857/S2500262722050106
16. Плотников А.М., Кабдунова Г.С. Баланс элементов питания и продуктивность зернопарового севооборота при применении минеральных удобрений // Пробл. агрохим. и экол. 2018. № 1. С. 38–41.
17. Дзюин Г.П., Дзюин А.Г. Коэффициенты использования азота, фосфора и калия из минеральных удобрений, навоза и почвы культурами севооборота // Международ. журн. эксп. образ-я. 2016. № 5(Ч. 1). С. 83–90.
18. Дуйшембиев Н.Д., Ахматбеков М.А., Мамбетов К.Б., Жайнакова Г.Б., Эмиль У.У. Коэффициенты использования элементов питания растениями в севообороте, при длительном применении удобрений // Вестн. Кыргыз. нац. аграрн. ун-та им. К.И. Скрябина. 2018. № 2(47). С. 51–58.

Influence of Long-Term Use of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Fertilizers on Crop Yields, the Balance of Organic Carbon and Nutrients

M. T. Vasbieva^{a,#} D. G. Shishkov^a

^a*Perm Research Institute of Agriculture – branch of the PFRC Ural Branch of the RAS,
ul. Cultures 12, p. Lobanovo, Perm district, Perm region 614532, Russia*

[#]*E-mail: vasbieva@mail.ru*

The efficiency of using nitrogen, phosphorus and potash fertilizers (N90, P90, K90, N90P90, N90K90, P90K90, N90P90K90, N30P30K30, N60P60K60, N120P120K120, N150P150K150) in a long-term experiment (year of establishing— 1978, Permian Research Institute) on sod-podzolic heavy loamy soil in a field 8-pole crop rotation was evaluated. It was found that in the climatic conditions of the Urals, the use of N90 on winter rye and oats was the most effective (taking into account the payback of 1 kg of a.s. NPK with 1 kg of main products), on potatoes – (NPK)30–60, spring wheat – N60P60K60, barley – N30P30K30. There was no significant effect of mineral fertilizers on the yield of meadow clover hay of the 1st and 2nd year of use. Crop rotation productivity increased by 12–25% on average over 5 rotations when using N90, N90P90, N90K90, P90K90, and (NPK)30–150. The maximum productivity was obtained in the N60P60K60 variant – 3.31 tons of grain, the highest payback was achieved when applying nitrogen fertilizers N90 (8.9 kg of grain). At the same time, prolonged use of the mononitrogen fertilizer system led to a deterioration in soil fertility. The use of superphosphate and potassium chloride in its pure form did not significantly affect the productivity of crop rotation. The balances of organic carbon and mineral nutrition elements were calculated. A positive carbon balance was obtained using high doses of N120P120K120 and N150P150K150 (+0.06–0.13 t/ha/year), only in these variants the maintenance of the C_{org} content in the soil layer (0–20 cm) at the initial level was noted. The nitrogen balance, which is close to zero and positive, was formed when nitrogen fertilizers were applied at a dose of 90–150 kg a.s./ha. A positive phosphorus balance was obtained by applying superphosphate at a dose of 60 kg a.s./ha and more. A zero and positive potassium balance was formed when potassium chloride was used at a dose of 120–150 kg a.s./ha.

Keywords: field crop rotation, mineral fertilizers, crop productivity, balance of organic carbon, nitrogen, phosphorus, potassium, sod-podzolic soil.