

УДК 631.82:631.421.1:631.445.41 (470.4)

ИЗУЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В СТАЦИОНАРНОМ ОПЫТЕ В СТЕПНОМ ПОВОЛЖЬЕ

© 2023 г. В. В. Пронько^{1,*}, Д. Ю. Журавлев², Т. М. Ярошенко², Н. Ф. Климова²

¹Научно производственное объединение “Сила жизни”
410005 Саратов, ул. Большая Садовая, 239, Россия

²Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока
410010 Саратов, ул. Тулайкова, 7, Россия

*E-mail: victor-pronko@mail.ru

Поступила в редакцию 08.08.2022 г.

После доработки 11.10.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

Представлен анализ результатов, полученных за 48 лет в длительном стационарном опыте с удобрениями, который расположен в Саратовской обл. (Россия) на черноземе южном тяжелосуглинистом. Изучено влияние различных видов и доз минеральных удобрений на продуктивность 6-польного севооборота, урожайность и качество зерна возделываемых культур (озимой и яровой пшеницы, проса, ячменя, овса). Выявлены оптимальные для засушливой степи Поволжья дозы удобрений, обеспечивающие максимальные прибавки урожая и наибольшую окупаемость 1 кг д.в. удобрений. Показано влияние условий увлажнения вегетационного периода на урожайность зерновых культур, накопления белка в зерне и вынос из почвы элементов питания. Установлены масштабы потерь углерода, валовых запасов азота и фосфора как из неудобренной почвы, так и при систематическом внесении различных доз минеральных удобрений за 48 лет наблюдений.

Ключевые слова: чернозем южный, длительный стационарный опыт, минеральные удобрения, продуктивность севооборота, окупаемость удобрений, степное Поволжье.

DOI: 10.31857/S0002188123020126, **EDN:** MTBCFJ

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития мирового земледелия улучшить состояние почвенного покрова агроландшафтов и повысить продуктивность сельскохозяйственных культур можно путем рационального использования удобрений (исключения представляют только случаи мелиоративного и инженерного вмешательства). Из ранее опубликованных работ известно, что действие удобрений зависит от многих факторов: свойств почвы, климатических и погодных условий, биологических особенностей возделываемых культур, сроков, способов, доз внесения удобрений и соотношения в них питательных веществ [1, 2].

В свою очередь, удобрения, внесенные в почву, заметно влияют не только на урожайность сельскохозяйственных культур, но и на плодородие почвы [3]. Оценить то многостороннее действие удобрений, которое они оказывают на свойства почвы, можно только в стационарных опытах. Причем точность и обоснованность выводов повышается с увеличением продолжительности наблюдений. Это, безусловно, способствует

повышению достоверности прогнозных оценок изменения тех или иных показателей плодородия изученных почв.

Очень большое значение имеет еще одно обстоятельство. В Поволжье, начиная с середины 1950-х гг., происходит изменение климата. Вкратце оно сводится к следующему: отмечен устойчивый рост температуры воздуха, особенно в холодный период года. Зимы становятся более мягкими, также увеличиваются теплообеспеченность и продолжительность вегетационного периода. В холодный период выпадает большее количество осадков. Они повышают запасы влаги рано весной. Одновременно резко сократилась норма осадков за май–июль. На фоне роста температуры воздуха это увеличивает несоответствие между запасами влаги в почве и потребностями растений. По этим причинам в конце XX-го и в начале XXI-го веков участилась повторяемость засух сильной интенсивности [4].

Отмеченные изменения агроклиматических характеристик не только создают другие условия для роста и развития растений, но и, соответ-

ственно, изменяют их отзывчивость на удобрения. Снижается урожайность отдельных видов культур и увеличивается вариация урожайности по годам. Также изменяются количество и качество растительных остатков, соотношения между растворимыми и нерастворимыми соединениями гумуса, поведение в почве солей кальция и фосфора, активность почвенных микроорганизмов и ферментов. Отсюда становится очевидной настоятельная необходимость в создании и успешном функционировании сети длительных стационарных опытов и мониторинговых площадок с удобрениями.

В 1968 г. под руководством профессора М.П. Чуб в научно-исследовательском институте сельского хозяйства Юго-Востока (г. Саратов) на черноземе южном был заложен длительный стационарный опыт с удобрениями. Повторные закладки этого опыта во времени осуществляли после уравнительных посевов в 1969, 1970 и 1971 гг. До 1992 г. в опыте функционировал 6-польный зернопаропропашной севооборот со следующей сменой возделываемых культур: пар чистый—озимая пшеница—яровая пшеница—кукуруза на зеленую массу—яровая пшеница—ячмень. В 1992 г. приняли другую схему чередования культур, которая существует и в настоящее время: пар чистый—озимая пшеница—яровая пшеница—просо—ячмень—овес. В 2018 г. в опыте завершена 8-я ротация на всех 3-х закладках 6-польного севооборота. В настоящее время в стадии завершения проходит 9-я ротация.

Цель работы — обобщить результаты длительных наблюдений за изменениями продуктивности севооборота, урожайности зерновых культур, плодородия чернозема южного и окупаемости изученных систем удобрения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В первых 3-х ротациях вносили азотные, фосфорные и калийные минеральные удобрения. Было установлено, что за 20 лет применения калийных удобрений они не оказали положительного влияния как на урожайность культур, так и агрохимические свойства почвы. Поэтому, начиная с 4-й ротации, в опыте применяют только азотные и фосфорные минеральные удобрения, а также их различные сочетания. Ежегодно их заделывают осенью под отвальную вспашку на 22–25 см, которую применяют на всех полях севооборота. Только в посевах озимой пшеницы азотные удобрения вносят в позднеосеннюю подкормку.

Ранее в опыте присутствовали варианты с навозом крупного рогатого скота. В 1-й ротации на-

воз 40 т/га вносили под вспашку чистого пара. Во 2–5-й ротациях его дозу снизили до 20 т/га, начиная с 6-й ротации навоз перестали вносить по организационным причинам. В настоящее время в стационарном опыте ежегодно изучают 20–23 различных вариантов систем удобрения. Они позволяют определить оптимальную насыщенность севооборотов азотными и фосфорными удобрениями, выявить их лучшие дозы и сочетания для различных видов сельскохозяйственных растений, периодичность внесения в севообороте, обосновать приемы повышения окупаемости применяемых удобрений, установить влияние погодных условий на использование растениями удобрений, осуществить мониторинг за трансформацией агрохимических свойств почвы под влиянием удобрений.

Стационарный опыт размещен на черноземе южном малогумусном среднемощном тяжелосуглинистом. При закладке стационарного опыта в почве опытного участка содержание гумуса в слое 0–20 см составляло 4.60–4.45%, общего азота — 0.24, общего фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) — соответственно 0.12 и 1.60%. В степных агроландшафтах Поволжья (Самарская, Саратовская, Волгоградская, Пензенская обл.) на долю чернозема южного приходится $\approx 30\%$ территории, что составляет > 2 млн га.

Закладку стационарного опыта и агрохимические исследования осуществляли по общепринятым в Российской Федерации методическим указаниям [5, 6]. Повторность стационарного опыта в пространстве трехкратная. Площадь одной делянки — 235 м², их размещение — рендомизированное. Во время вегетации растений приемы ухода (подкормки, обработка пестицидами и др.) не проводили. Уборку урожая зерновых культур осуществляли малогабаритными комбайнами Сампо-500 и Сампо-130, кукурузы — вручную методом пробных площадок. Оставшуюся солому после уборки урожая отчуждали с поля. Подробное описание методики проведения стационарного опыта, используемых методов агрохимических анализов и результаты отдельных этапов исследований ранее опубликованы в российской научной литературе [7–9]. В настоящем сообщении подведены итоги изучения длительного действия минеральных удобрений на урожайность зерновых культур и плодородие чернозема южного за 8 ротаций 6-польного севооборота.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Продуктивность зернопарового севооборота и эффективность удобрений. Подсчет продуктивно-

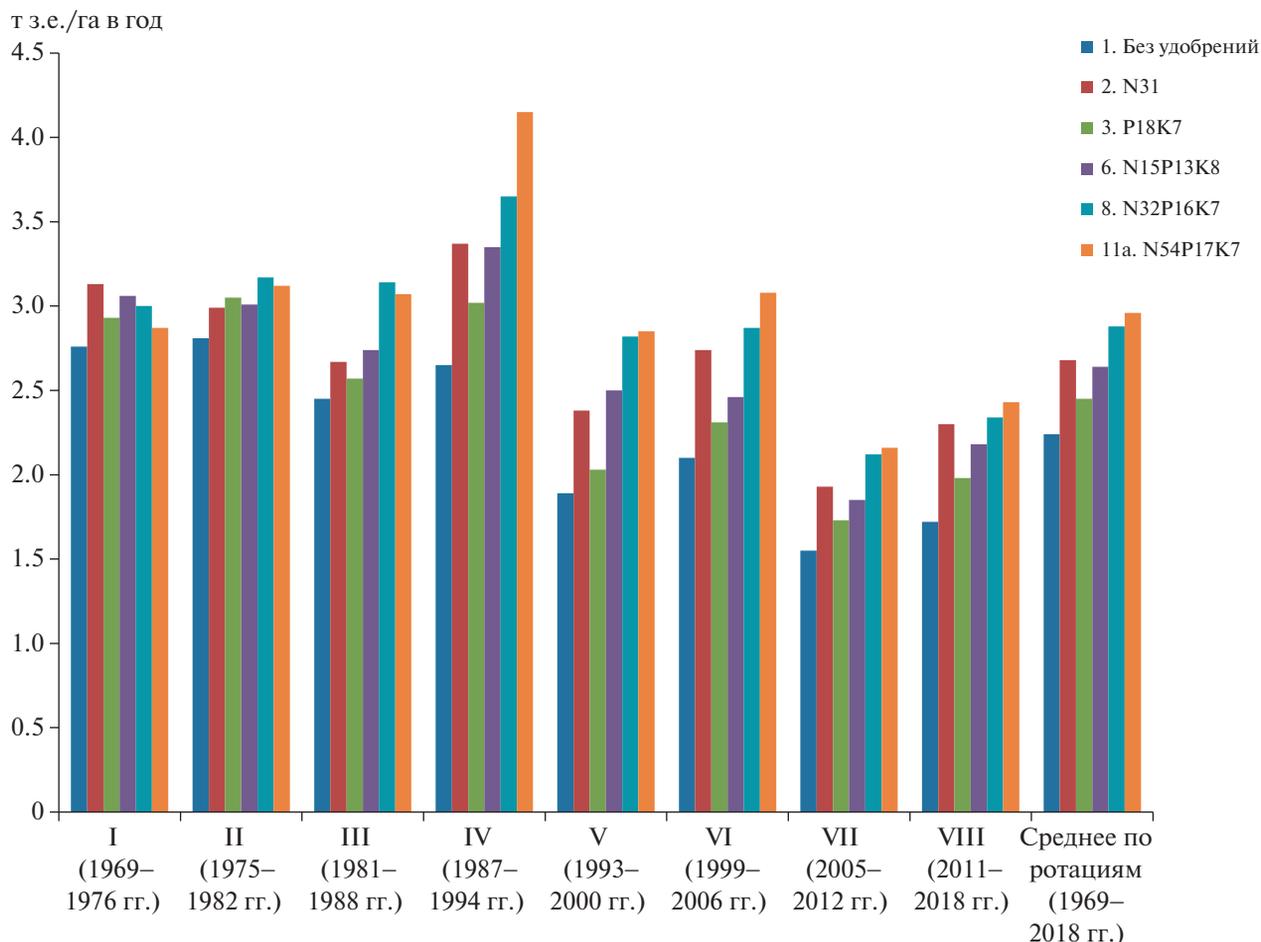


Рис. 1. Продуктивность зернопарового севооборота за 8 ротаций, т/га севооборотной площади.

сти севооборота осуществляли следующим образом. По принятым в Российской Федерации методикам, в каждом варианте подсчитывали не только массу урожая зерна, но и количество полученной побочной продукции. Для зерновых культур – это солома, для кормовых – надземная биомасса растений. Массу побочной продукции переводили в зерновые единицы (з.е.) с помощью переводных коэффициентов. Применительно к культурам данного севооборота они составляли: для соломы озимой пшеницы – 0.20, соломы яровой пшеницы – 0.25, соломы проса – 0.25, соломы ячменя – 0.25, овса – 0.30. Величину массы соломы умножали на соответствующие коэффициенты, получая зерновые единицы (в кг или т), и их суммировали с величиной массы зерна, полученного в том или ином варианте. Подобные перерасчеты производили в соответствии с «Методическими рекомендациями по проведению длительных стационарных опытов» под ред. В.Д. Панникова и В.Г. Минеева (М.: ВИУА, 1982).

Установлено, что влияние удобрений на урожайность как отдельных культур, так и продуктивность севооборота в целом, во многом зависело от погодных условий (рис. 1). В 1-й ротации севооборота преобладали годы с благоприятным увлажнением. В этих условиях наиболее эффективными оказались азотные удобрения (N31), обеспечившие прибавку урожая 0.37 т з.е./га. Прирост урожайности от фосфорных удобрений составлял лишь половину прибавки урожайности от азота (вариант 3). Более высокие дозы удобрений не имели преимущества, а окупаемость 1 кг д.в. при этом снизилась в 2 и более раза (вариант 11а).

Во 2-й ротации урожайность в контроле оказалась практически такой же, как и в 1-й ротации (2.80 т/га). Однако в связи с более засушливыми условиями действие фосфорных удобрений усилилось. Оптимальная прибавка урожайности в 0.38 т/га при наибольшей оплате 1 кг питательных веществ удобрений (6.2 кг з.е.) получена при применении N38P13K8 (вариант 7).

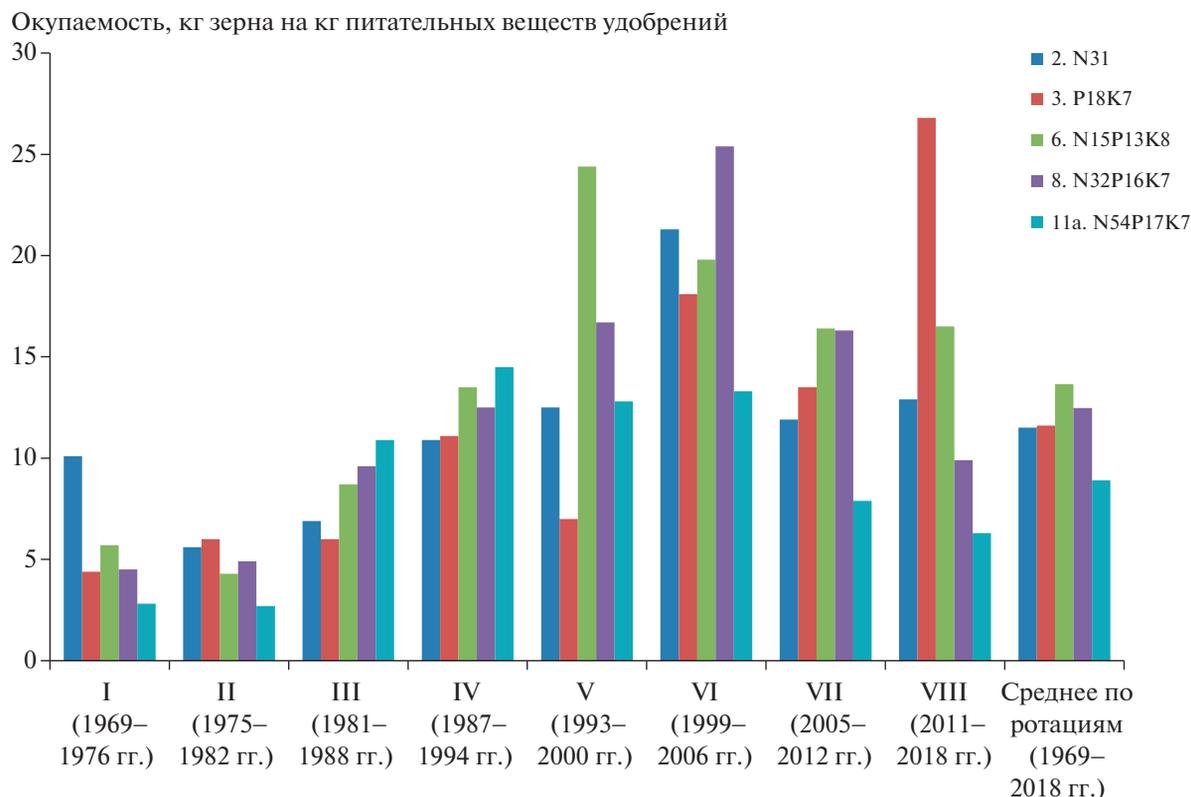


Рис. 2. Окупаемость д.в. удобрений урожаем зерна (кг) за годы исследований.

В период 3-й ротации сложились неблагоприятные погодные условия для возделывания зерновых. Урожайность в контроле по сравнению с 1-й ротацией снизилась на 11%, но при этом возросли абсолютные прибавки урожайности при применении удобрений. Наибольшее увеличение урожайности (на 0.69 т з.е./га) получено в варианте 8 (N32P16K7) при оплате 1 кг питательных веществ 9.6 кг з.е./га (рис. 2). Увеличение дозы азота до N54 (вариант 11а) не имело преимущества перед вариантом 8. В результате систематического применения фосфорных удобрений и накопления легкогидролизуемых фосфатов фосфорные удобрения в этой ротации действовали слабо. Не высокая прибавка урожая (0.22 т з.е./га) была получена и при применении азотных удобрений (N31).

Четвертая ротация по погодным условиям оказалась самой благоприятной за весь 48-летний период. Среднегодовая продуктивность в контрольном варианте составила 2.65 т з.е./га. Благодаря хорошей влагообеспеченности у культур возникла потребность в дополнительном минеральном питании, соответственно и прибавки урожая от удобрений в этой ротации заметно возросли (рис. 1).

Например, внесение N31 на 1 га севооборотной площади повысило урожайность на 0.72 т з.е./га, от P18K7 (вариант 3) — прибавка урожайности была в 2 раза меньше. Хорошие результаты в 4-й ротации показал вариант 8 (прибавка 0.92 т з.е./га) при оплате 1 кг питательных веществ 14.7 кг з.е. (рис. 2). Максимальный среднегодовой прирост урожайности в 1.5 т/га получен в варианте 11а при применении N54P17K7 при практически такой же оплате 1 кг питательных веществ (14.5 кг з.е.) как и в варианте 8.

В 5-й ротации имело место довольно резкое снижение урожайности в контроле (на 32% по отношению к 1-й ротации). Это было обусловлено неблагоприятными гидротермическими условиями в 1993–2000 гг. Самая высокая прибавка урожайности в этих условиях была получена в варианте 8 при применении N32P16K7 (0.86 т з.е./га) при оплате 1 кг д.в. удобрений 19.5 кг з.е. соответственно. Внесение N54P17K7 (вариант 11а) не сопровождалось ростом прибавки урожайности. При этом окупаемость 1 кг питательных веществ снизилась до 12.8 кг з.е.

В 6-й ротации по сравнению с 1-й продуктивность севооборота в контроле уменьшилась на 24%, что было следствием существенного умень-

шения плодородия неудобренной почвы. Максимальное увеличение урожайности на 0.98 т/га обеспечило применение N54P17K7 (вариант 11а). При этом резко снизилась оплата удобрениями 1 кг питательных веществ до 13.3 кг з.е.

В 7-й ротации продолжалось заметное снижение урожайности в контроле по сравнению с исходным показателем (на 44%). Оптимальную прибавку урожайности 0.3 т/га при оплате 1 кг питательных веществ в 16.4 кг з.е. получили в варианте 6 (N15P13K8/га севооборотной площади). Повышение дозы удобрений (N54P17K7) не имело существенного преимущества перед оптимальным вариантом. При этом в 2 раза снизилась окупаемость 1 кг удобрения урожаем з.е. Следует также отметить, что урожайность зерновых в 7-й ротации севооборота на фоне оптимальной дозы минеральных удобрений в варианте 6 (2.16 т з.е./га) не достигала уровня контроля в 1-й ротации (2.76 т з.е./га).

В 8-й ротации севооборота (2012–2018 гг.) среднегодовая продуктивность контрольного варианта была равна всего 1.41 т з.е./га. Внесение одних азотных удобрений (вариант 2) позволило получить 1.82 т з.е./га (рис. 1). В варианте 3 от фосфорных удобрений среднегодовая прибавка урожайности в севообороте составила 0.30 т з.е./га. Азотно-фосфорные удобрения в средних (вариант 8) и высоких (вариант 11а) дозах увеличили продуктивность за ротацию до 1.94 и 2.10 т з.е./га соответственно. Однако окупаемость 1 кг д.в. удобрений снизилась при этом с 7.5 в варианте 8 до 5.5 кг з.е. в варианте 11а (рис. 2).

В среднем за 48 лет исследования продуктивность зернопарового севооборота в агроландшафтах степного Поволжья без внесения удобрений составила 2.24 т з.е./га севооборотной площади. Максимальная среднегодовая урожайность (2.96 т/га) получена при внесении N54P17K7/га севооборотной площади (вариант 11а). Близкие результаты (2.88 т з.е./га) показало применение N32P16K7. Окупаемость 1 кг д.в. удобрений в этих вариантах составила соответственно 8.9 и 12.5 кг з.е.

Ежегодные учеты урожайности и ее прибавки от удобрений в рассматриваемом стационарном опыте позволили обосновать новые выводы, имеющие большое научное и практическое значение.

1. Опровергнуто устоявшееся в агрономических кругах мнение (впервые оно было изложено в научной литературе России еще в 1930-е гг.) о том, что в засушливых условиях Юго-Востока удобрения действуют слабо. В нашем опыте максимальные прибавки урожайности при примене-

нии оптимальных доз удобрений в 1-й ротации достигли 0.37 т з.е./га (13% к контролю), а в 8-й ротации – 0.71 т/га (41% к контролю). Следовательно, в засушливых агроландшафтах Поволжья можно получить такие же, как и в благоприятных условиях, абсолютные (в т/га) и относительные (в %) прибавки урожайности при применении удобрений.

2. Выявлена роль отдельных элементов питания в повышении урожаев зерновых культур. Дело в том, что в агрономической литературе (в том числе и в учебниках) распространено мнение о ведущей роли фосфора в системе удобрений для районов недостаточного увлажнения. Основано оно на том, что фосфор способствует росту корней, тем самым повышая устойчивость зерновых культур к дефициту влаги. Наши исследования показали, что первые 10–12 лет, когда в почве содержалось 10–12 мг/кг солей фосфора, извлекаемых 1%-ной вытяжкой углекислого аммония, прибавки урожаев зерновых культур от азотных и фосфорных удобрений были практически одинаковыми. Когда содержание доступных фосфатов достигло 25–30 мг/кг (в результате систематического применения фосфорных удобрений), размер прибавок урожайности стал главным образом зависеть от дозы азотных удобрений. Отсюда следует, что мнение о доминирующей роли фосфора в засушливых условиях нельзя признать однозначным.

3. При содержании в почве фосфора в размере 25–30 мг/кг, определяемого по методу Мачигина, отзывчивость зерновых культур на внесение фосфорных удобрений резко снижается (прибавки урожайности зерна от фосфора в большинстве случаев становятся статистически недостоверными). В подобной ситуации стало возможным в последних 4-х ротациях севооборота экономически и агрономически целесообразным вносить поддерживающую дозу фосфора в количестве P7/га севооборотной площади.

4. Внесение калийных удобрений в течение 20 лет (как отдельно, так и в различных сочетаниях с азотом и фосфором) не оказало влияния на урожайность зерновых культур и на агрохимические свойства чернозема южного. Причина – высокие и очень высокие запасы доступных соединений калия в почвах тяжелого гранулометрического состава, где доминируют глинистые минералы.

5. Длительные наблюдения в условиях стационарного опыта позволили установить влияние климатических условий в Поволжье (о чем говорилось выше) на продуктивность зерновых куль-

Таблица 1. Изменения продуктивности, прибавок урожайности культур от удобрений и их окупаемости при усилении засушливых условий

Показатель (среднее в ротациях)	Без удобрений, т з.е./га	Варианты					
		8 (N32P16K7)		11а (N54P17K7)		8	11а
		1	2	1	2	Окупаемость 1 кг д.в. удобрений, кг	
I–IV	2.67	3.24	0.57	3.30	0.63	10.4	8.1
V–VIII	1.82	2.54	0.72	2.63	0.81	13.1	10.4
Изменения к контролю, %	68	78	–	80	–	126	128

Примечание. В графе 1 – продуктивность, т з.е./га, 2 – прибавка продуктивности к контролю, т з.е./га.

тур. Для решения этой задачи рассчитали средние показатели продуктивности и окупаемости удобрений отдельно для 1–4-й ротаций и 5–8-й. Такой подход дал возможность выявить масштабы снижения продуктивности сельскохозяйственных культур с усилением засушливых проявлений. Расчеты представлены в табл. 1. Они показали, что среднегодовая продуктивность севооборота без удобрений при активизации засушливых процессов (снижение суммы осадков в теплый период, повышение дневных температур, увеличение количества засух) в конечном итоге снизилась на 32%. В варианте 8 средняя урожайность в 1–4-й ротациях составила 3.24 т з.е./га, а в 5–8-й она стала на 22% меньше. В варианте 11а продуктивность зерновых к концу 7-й ротации снизилась на 20%. Но при этом прибавка урожайности зерновых в варианте 8 повысилась на 26%, а в варианте 11а – на 29%. Окупаемость 1 кг д.в. удобрений возросла в варианте 8 в 1.26 раза, в варианте 11а – в 1.28 раза. Все вышеизложенное убеждает нас в том, что негативное влияние засушливых процессов сильнее проявлялось в неудобренных агроландшафтах. Удобрения в значительной мере снижали отрицательное действие засухи и их роль в формировании урожая резко повышалась.

Вынос и баланс питательных элементов в севообороте. Повышение урожайности сельскохозяйственных культур в удобренных вариантах привело к изменению размера выноса элементов питания основной и побочной продукцией. Суммарный вынос азота в контрольном варианте в 1–4-й ротациях изменялся незначительно и менялся в зависимости от ротации в пределах 259–276 кг/га. К 8-й ротации в связи со снижением урожайности он стабильно уменьшался, и его величина оказалась в итоге на 59% меньше, чем в начале опыта. Среднегодовой вынос азота в зоне южных черноземов в среднем за 48 лет наблюдений составил 38.3 кг/га. Изученные системы удобрения

повышали вынос данного элемента. Больше всего его отчуждалось из почвы с основной и побочной продукцией в варианте 11а (на 56% больше контроля).

Варьирование выноса фосфора в ротациях севооборота также имело место. Но оно было не столь резким, как вынос азота. Удобренные растения также отчуждали из почвы больше фосфора (на 29–30% больше, чем в контроле). В среднем за 48 лет вынос данного элемента в контрольном варианте составил 16.9 кг/га севооборотной площади, а в удобренных вариантах – 19.0–21.6 кг.

Калийные удобрения в стационарном опыте вносили в небольших количествах только в 1-, 2- и 4-й ротациях. Примененные дозы калия не оказали существенного влияния на вынос данного элемента. Он всецело определялся действием азотных и фосфорных удобрений и менялся в удобренных вариантах в 8-й ротации в среднем в год от 37.0 до 50.0 кг/га. В контроле вынос калия составил 34.1 кг/га.

Баланс питательных веществ наиболее полно отражает степень возмещения выноса питательных веществ за счет применения минеральных удобрений. При расчете баланса азота в расходную часть включали вынос элементов питания в среднем за 48 лет, а также среднегодовые потери на эрозию (в количестве 2 кг/га) и потери азота из удобрений на денитрификацию (15% от дозы). В приходной статье учитывали поступление азота с семенами, осадками и за счет деятельности свободноживущих микроорганизмов в количестве 13.5 кг/га в неудобренном контроле и 18.5 кг/га – в удобренных вариантах.

Расчеты показали, что интенсивность баланса азота, т.е. доля возмещения его выноса в контрольном варианте составила 33.4%. Применение N30–35/га севооборотной площади снизило дефицит азота до 12.7% (вариант 8). Полное возме-

шение выноса отмечено в варианте 11а, где вносили N54.

Дефицит фосфора в неудобренном контроле в среднем за 48 лет составил 16.6 кг/га с интенсивностью баланса 6.7%. Внесение в среднем P19.3 в год (вариант 3) возмещало потери фосфора на 91.4–100.4%. Азотные удобрения (вариант 2) не оказали положительного влияния на баланс фосфора.

Среднегодовой баланс калия в контрольном варианте показал нулевую интенсивность, поскольку имел место только расход этого элемента из почвы, а приход полностью отсутствовал. В вариантах с применением удобрений, где периодически вносили калий, интенсивность его баланса менялась от 11.0 (N32P16K7) до 18.3% (N54P17K7). Столь незначительное возмещение выноса обусловлено не только малыми дозами калийного удобрения. Большую роль сыграло и то обстоятельство, что под влиянием азотно-фосфорных удобрений повышался вынос из почвы основной и побочной продукцией не только азота и фосфора, но и калия [11].

Одним из важных критериев при оценке эффективности изученных систем удобрения является балансовый коэффициент использования питательных веществ. Анализ результатов длительного стационарного опыта показал, что в варианте 8 (N32P16K7), который обеспечил оптимальное соотношение прибавки урожайности и окупаемости 1 кг д.в. удобрений, коэффициент использования азота составил 43.9, фосфора — 34.3%. Внесение азотных удобрений выше оптимального уровня (N54P17K7) не повлияло на величину балансового коэффициента использования азота. Минимальная система удобрения (N15P13K8) показала самый высокий коэффициент использования азотных удобрений, но это привело к снижению продуктивности севооборота.

Аналогичным было изменение коэффициентов использования фосфора: повышение или снижение дозы фосфорных удобрений не сопровождалось увеличением коэффициентов, а продуктивность севооборота при этом не превышала оптимального уровня (N32P16K7).

Коэффициенты использования калия во всех вариантах получились выше 100%. Это указывает на то, что обеспечение сельскохозяйственных культур калием осуществлялось главным образом за счет его почвенных запасов.

Значимость определений баланса питательных веществ в агроландшафтах засушливого Поволжья сводится к следующему. Ранее проведенными исследованиями установлены оптимальные

уровни возврата в почву с удобрениями элементов питания: азота — 95–100% от его выноса, фосфора — 110–130% от выноса, калия — 18–20% от выноса (только для почв засушливой зоны). Результаты стационарного опыта позволили определить, что для достижения оптимального уровня возврата, получения экономически оправданных прибавок урожайности и стабилизации агрохимических свойств черноземных почв засушливого Поволжья на 1 га севооборотной площади необходимо вносить с удобрениями 30–35 кг азота и 18–20 кг фосфора.

Коэффициенты использования питательных веществ из удобрений, установленные в стационарном опыте, имеют большое значение при планировании потребности регионов, областей, районов и крупных агрохолдингов в удобрениях.

Урожайность зерновых культур в севообороте и ее зависимость от погодных условий. В научной литературе имеется много фактического материала о существенном влиянии погодных условий не только на величину урожайности, но и на отзывчивость сельскохозяйственных культур на применяемые удобрения. Общеизвестно положение о том, что в благоприятных погодных условиях растения лучше отзываются на применение удобрений [1, 4, 10]. Однако необходима детализация сведений в том, какие виды удобрений дают максимальный эффект в тех или иных погодных условиях. Для решения этого вопроса произвели группировку результатов исследования в стационарном опыте в зависимости от условий увлажнения вегетационного периода. Все показатели урожайности сельскохозяйственных культур распределили на 3 группы: влагообеспеченные, среднезасушливые и острозасушливые годы. Разделение осуществляли по величине гидротермического коэффициента (ГТК), предложенного Г.Т. Селяниновым, который отражает отношение суммы осадков и суммы температур за вегетационный период. Такой подход позволил установить следующее.

В наших опытах озимую пшеницу возделывали после черного пара и непаровых предшественников. Это очень сильно влияло на обеспеченность посевов влагой и питательными веществами. Например, в зависимости от количества осадков, выпавших за период парования чистого пара, содержание нитратного азота в слое 0–40 см к посеву озимых находилось в пределах от 53 до 139 кг/га, а суммы нитратного и аммонийного азота — от 60 до 207 кг/га. Под непаровыми предшественниками нитрификационная деятельность была слабой. Запасов минерального азота к посеву озимой пшеницы в этом случае обнаруже-

но в 2.0–2.5 раза меньше, чем после чистого пара (соответственно 25–46 кг N–NO₃/га и 30–89 кг (N–NO₃ + N–NH₄)/га).

Анализ условий увлажнения и обеспеченности растений минеральным азотом показал следующее. В группе влагообеспеченных лет без удобрений средняя урожайность зерна озимой пшеницы после чистого пара составила 3.59 т/га с изменениями по годам от 2.40 до 5.29 т/га. После непаровых предшественников в контроле средний сбор зерна был равен всего 1.97 т/га с изменениями от 1.57 до 2.55 т/га. Ввиду хорошей обеспеченности чистых паров элементами питания эффективность азотно-фосфорных удобрений была невысокой – прирост урожайности в среднем за 17 лет составил 0.57 т/га. После непаровых предшественников, где ощущался недостаток минерального азота, в условиях оптимального увлажнения прибавка урожайности озимой пшеницы оказалась в 2.4 раза больше, чем после чистых паров.

В средnezасушливые годы запасы минерального азота перед посевом были такие же, как и в условиях оптимального увлажнения. Но дефицит влаги привел к тому, что после чистого пара урожайность озимой пшеницы в этой группе лет менялась от 1.58 до 2.60 т/га, а после непаровых предшественников – от 0.98 до 1.98 т/га. Отзывчивость на азотно-фосфорные удобрения также оказалась невысокой.

При возделывании яровой пшеницы во влагообеспеченные годы отмечали относительно равномерное распределение атмосферных осадков в течение всего вегетационного периода. Это создавало оптимальные условия для нитрификационной деятельности, и в почве накапливалось нитратного азота к посеву яровой пшеницы порядка 65–68 кг/га. В таких условиях прирост урожайности от азотно-фосфорных удобрений в среднем за 20 лет составил 0.28 т/га.

В группе средnezасушливых лет урожайность яровой пшеницы в неудобренном контроле варьировала в широких пределах – от 0.76 до 2.31 т/га. При недостатке влаги сбор зерна данной культуры и эффективность удобрений повышались в те годы, когда минимум осадков приходился на период образования вторичных корней яровой пшеницы. В среднем за 20 лет наблюдений прибавка зерна от внесения N38P13K8 составила 0.33 т/га – практически столько же, как и в условиях оптимального увлажнения.

В остроzасушливые годы продуктивность яровой пшеницы резко снижалась. В контроле собирали зерна от 0.6 до 0.96 т/га. Внесение минеральных удобрений повысило урожайность всего на

0.14 т/га. При этом следует отметить, что в данной группе лет все прибавки урожайности яровой пшеницы от удобрений были статистически недостоверными.

Улучшение пищевого режима почвы на удобренных делянках оказало положительное влияние на урожайность проса. При этом размер прибавок урожая зерна зависел и от погодных условий вегетационного периода. Самыми высокими они были во влагообеспеченные годы. В условиях оптимального увлажнения сильнее всего проявилось действие полного удобрения в дозе N38P13K8, где была получена самая высокая прибавка урожая – 30% к контролю.

В засушливые годы урожайность проса резко снижалась. Например, в контроле средний сбор зерна оказался в 2.1 раза меньше, чем в условиях благоприятного увлажнения. Азотно-фосфорные удобрения N38P13K8 в средnezасушливые годы позволили получить дополнительно к контролю зерно в количестве 0.52 т/га.

В остроzасушливые годы статистически достоверные прибавки урожайности проса от удобрений были зафиксированы только в 2002 г. в отдельных вариантах опыта. В 1998 и 2010 гг. различия в вариантах были статистически несущественными ($F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$). В среднем в рассматриваемой группе лет прирост урожайности зерна от удобрений менялся в пределах 60–110 кг/га.

Гидротермические условия и минеральные удобрения оказали большое влияние на пищевой режим чернозема южного и при возделывании ярового ячменя. В годы с хорошей влагообеспеченностью содержание нитратного азота в период всходы–кушение в слое почвы 0–40 см в контрольном варианте было равно 38 кг/га, при внесении N40–80–54 кг/га. В группе средnezасушливых лет содержание N–NO₃ было повышенным и практически таким же, как и во влагообеспеченные годы. В остроzасушливые годы обеспеченность ячменя минеральным азотом находилась на среднем уровне.

Заделка в почву фосфорных удобрений во влагообеспеченные годы практически удвоила фосфатный фонд чернозема южного по сравнению с контролем. В группах средnezасушливых и остроzасушливых лет обеспеченность доступными фосфатами в вариантах с азотно-фосфорными удобрениями была повышенной и высокой (31–45 мг/кг почвы в 1%-ной углеаммонийной вытяжке).

Улучшение пищевого режима чернозема южного и изменения условий увлажнения вегетационного периода оказали большое влияние на про-

дуктивность ячменя и его отзывчивость на удобрения. Во влагообеспеченные годы максимальная урожайность ячменя отмечена при внесении N38P13K8. В среднезасушливые годы лучшие результаты обеспечил вариант N60, а в острозасушливые годы – N38P13K8. Следует также отметить, что в острозасушливые годы урожайность ячменя в неудобренном контроле снизилась в 3.7 раза, а при внесении минеральных удобрений – в 3.2 раза.

За 8 ротаций зернопарового 6-польного севооборота овес возделывали 19 лет. Во влагообеспеченные годы содержание нитратного азота в почве контрольного варианта было очень низким (23–29 кг/га), а при внесении N60 оно доходило до 64–70 кг/га. Что касается среднезасушливых и острозасушливых лет, то нитратного азота в слое 0–40 см почвы имелось больше, чем во влагообеспеченные годы как в контроле, так и в удобренных вариантах (соответственно 38 и 55 кг/га).

Содержание доступного фосфора в неудобренной почве под овсом было стабильно низким и не зависело от гидротермических условий вегетационного периода (61–76 кг P₂O₅/га, или 12.8–16.0 мг P₂O₅/кг (по Мачигину в 1%-ной углеаммонийной вытяжке)). При внесении одних азотных удобрений (которые для этой культуры обеспечили максимальные прибавки урожайности) количество доступных фосфатов возрастало до 83–109 кг/га. Такое повышение обусловлено не только растворяющим влиянием солей азотной кислоты на труднодоступные соединения фосфатов почвы, но и периодическим внесением фосфорных удобрений под предшествующие культуры севооборота.

В опытах с овсом максимальные прибавки урожайности зерна от удобрений были получены во влагообеспеченные годы. В среднем в этой группе лет она составила 1.06 т/га при внесении N60, и окупаемость 1 кг д.в. удобрений урожаем достигала 17.7 кг.

В среднезасушливые годы прирост урожайности зерна при применении N60 оказался в 2.7 раза меньше, чем в группе влагообеспеченных лет. В острозасушливые годы урожайность овса как в контроле, так и в удобренных вариантах резко снижалась. Следует отметить, что в данной группе лет имела место высокая вариабельность величины урожайности. Например, в контроле изменения сборов зерна были от 0.25 (1998 г.) до 2.12 т/га (2011 г.).

При рассмотрении полученных результатов установлено, что прибавка урожайности зерна овса при применении удобрений в острозасушливые годы была в 3.9 раза больше, чем для яровой пшеницы.

В условиях рыночной экономики важнейшим критерием эффективности является окупаемость 1 кг д.в. удобрений урожаем зерна. Наши расчеты показали, что величина данного показателя у всех изученных культур определялась не только их видом и дозами удобрений, но и гидротермическими условиями вегетационного периода.

Во влагообеспеченные годы в длительном стационарном опыте при внесении N40P40 зафиксирована максимальная окупаемость 1 кг д.в. удобрений урожаем ячменя – 27 кг. В этом же варианте в группе острозасушливых лет на 1 кг д.в. удобрений получено 10.1 кг зерна. При возделывании овса с изменением условий увлажнения окупаемость менялась в пределах от 7.2 до 3.6 кг зерна на 1 кг д.в. удобрений. Минимальными эти показатели были для яровой пшеницы – 3.5 кг зерна во влагообеспеченные годы и 1.8 кг в острозасушливые.

Материалы данного раздела могут быть использованы для построения различных математических моделей для определения зависимости величины урожайности зерновых культур от условий возделывания, а также для составления прогнозных оценок и т.п.

Влияние удобрений и погодных условий на качество зерна. Длительными наблюдениями установлено, что после одинаковых предшественников на всех изученных агрофонах (включая контроль) в засушливые годы белка в зерне озимой пшеницы накапливалось больше, чем во влагообеспеченные. Минеральные удобрения при всех условиях влагообеспеченности оказали положительное влияние на содержание белка. Анализ результатов также показал, что накопление белка в зерне озимой пшеницы на уровне 13.0–14.3% возможно, если расходовать 2.2–2.9 кг азота на формирование 100 кг зерна с соответствующим количеством побочной продукции.

Применение N54P17K7 как во влажные, так и засушливые годы в чистом пару позволило собрать с зерном озимой пшеницы белка 374 кг/га (на 26% больше контроля).

Независимо от уровня влагообеспеченности вегетационного периода сбор белка с урожаем озимой пшеницы в значительной степени зависел от предшественника. По этому показателю озимая пшеница после чистого пара превосходила урожай, полученный после занятого пара, где средний выход белка в удобренном варианте составил 255, а в контроле – 151 кг/га.

В вариантах с внесением минеральных удобрений содержание белка в зерне яровой пшеницы также было больше по сравнению с неудобрен-

ным контролем. Больше всего его было в зерне, полученном с использованием азотных и азотно-фосфорных удобрений: в среднем за 22 года наблюдений этот показатель составил 244, а в неудобренном контроле — 182 кг/га. Что касается влияния погодных условий, то в условиях наших стационарных опытов подтвердилось общепризнанное положение о повышенном накоплении белка в засушливых условиях.

Применение минеральных удобрений положительно сказалось на характере накопления белка в зерне проса. Во всех удобренных вариантах стационарного опыта на протяжении 48 лет исследований его содержание в зерне превосходило неудобренный контроль. Например, если внесение N30 увеличивало содержание белка по сравнению с контролем в среднем в опыте на 18,8–20,0%, то при применении N60 превышение достигало 32,9%. Использование только лишь фосфорных удобрений в дозе P16 под просо не способствовало увеличению белковости зерна. В среднем за годы наблюдений в контрольном варианте сбор белка составил 108 кг/га, а в варианте с применением N54P17K7 — 181 кг/га или на 68% больше.

На белковость зерна ячменя сильное влияние оказали условия увлажнения вегетационного периода и азотные удобрения. Максимальное накопление белка в его зерне (15,4–15,7%) наблюдали в острозасушливые годы. В варианте N54P17K7 среднегодовой сбор белка ячменя составил 294, а в контроле — 158 кг/га. Дополнительный выход белка под влиянием удобрений был равен 136 кг/га, что на 86% больше контроля.

В наших опытах азотные удобрения и погодные условия также определяли содержание белка в зерне овса. В контроле во влажные годы в зерне овса накапливалось в среднем 9,6% белка (изменения по годам от 6,8 до 11,6%). Внесение N30 повысило содержание белка в зерне овса на 0,4, N60 — на 1,7%. Так как масса зерна овса на удобренных делянках заметно увеличивалась, то и сбор белка с единицы площади соответственно повышался (до 245 кг/га) по сравнению с контрольным вариантом, где его накапливалось 157 кг/га.

Таким образом, в стационарном опыте установлены факторы, влияющие на выход растительного белка с единицы площади: вид возделываемой культуры, удобрения и погодные условия. В удобренных агроландшафтах степного Поволжья по величине сбора белка культуры севооборота расположились в следующей убывающей последовательности: озимая пшеница после чистого пара (374 кг/га), ячмень (294 кг/га), озимая пшени-

ца после занятого пара (255 кг/га), овес (245 кг/га), яровая пшеница (244 кг/га), просо (181 кг/га). Под влиянием удобрений максимальное превышение выхода белка над неудобренным контролем отмечено для ячменя (86%), озимой пшеницы после занятого пара (69%), проса (68%), овса (56%). Для озимой пшеницы после чистого пара и яровой мягкой пшеницы увеличения составили соответственно 26 и 34%.

Трансформация агрохимических свойств почвы. В стационарном опыте ежегодно определяли содержание доступных для растений соединений азота и фосфора в почве под всеми культурами севооборота. По завершении каждой ротации проводили определение запасов углерода, валовых форм азота, фосфора и их отдельных фракций.

Установлено, что в контрольном варианте исходное содержание углерода в среднем для 3-х полей менялось от 2,59% в слое 0–20 см почвы до 2,40% в слое 20–40 см. За 48 лет наблюдений в неудобренной почве минерализовалось углерода 8,45 т/га. Интенсивность и направленность процесса при этом изменялись как в зависимости от слоев гумусового горизонта, так и во времени (рис. 3).

Систематическое внесение минеральных удобрений оказало влияние на содержание углерода. В варианте N15P13K8 потери углерода к концу 2-й ротации были больше по сравнению с контролем на 18,1% (на 0,47 т/га или 0,04 т/га/год). К концу 4-й ротации при максимальных за весь период наблюдения потерях в контроле в рассматриваемом варианте запасы углерода оставались более стабильными: убыль оказалась на 1,63 т/га или в среднем на 0,27 т/га/год меньше по сравнению с контролем. В сумме за 8 ротаций в этом варианте степень минерализации органического вещества почвы была близка к уровню контроля. Таким образом, минимальная доза удобрений не имела существенного значения для гумусообразования по сравнению с контролем.

В варианте с дозой удобрений N32P16K7 до конца 5-й ротации потери углерода происходили относительно равномерно и менялись от 0,12 до 0,20 т/га/год. Следовательно, такая доза минеральных удобрений обеспечила относительную стабилизацию содержания гумуса южного чернозема за счет накопления запасов легкодоступных азотистых соединений, повышения прибавки урожайности и поступления большей массы растительных остатков на фоне изменения гидротермического режима осенних месяцев в период 2007–2012 гг. [13].

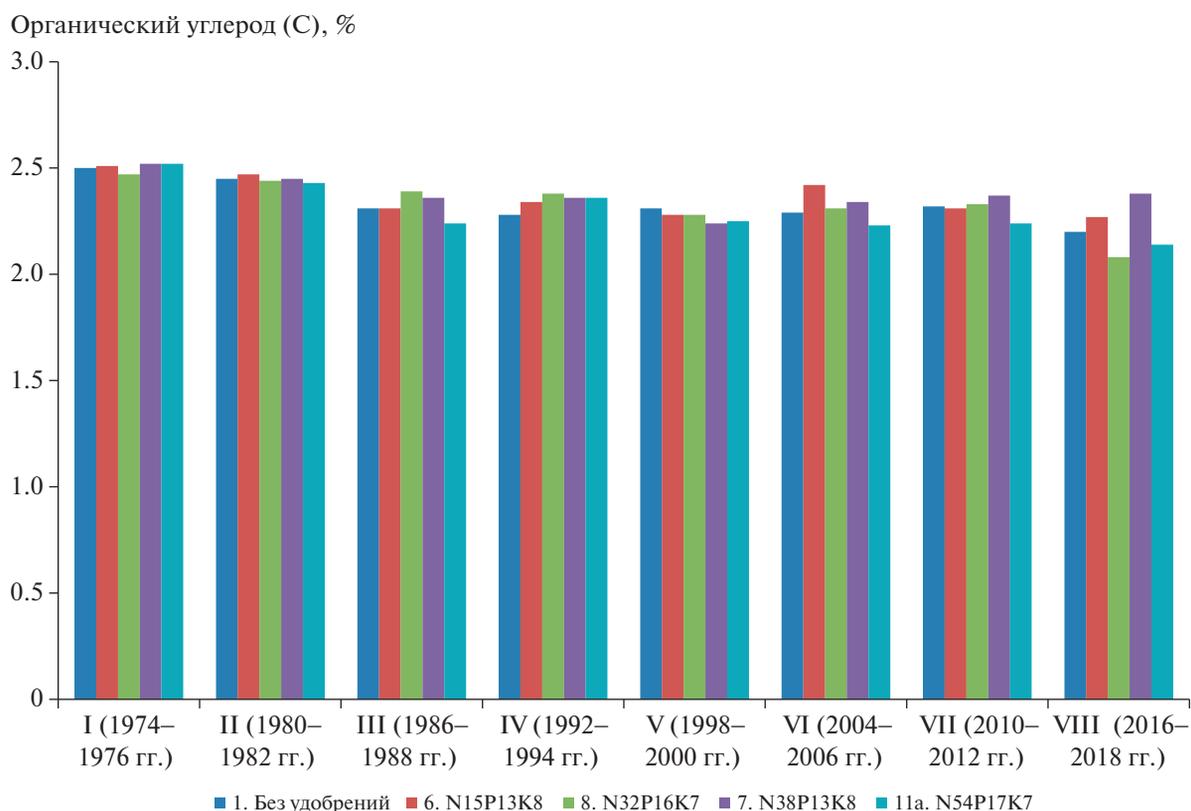


Рис. 3. Изменение содержания органического углерода в почве опыта (слой 0–40 см).

При среднегодовой дозе удобрений N38P13K8 до конца 4-й ротации ежегодные потери углерода менялись от 0.04 до 0.39 т/га. К концу 5-й ротации они достигли максимума (3.54 т/га за ротацию или 0.51 т/га/год). Это склонно связывать с влиянием повышенных доз азота. В 6–8-й ротациях в данном варианте отмечено увеличение содержания углерода, его потери по сравнению с исходными показателями сократились и были на 1.35 т/га меньше, чем в контроле (рис. 3).

При систематическом внесении на 1 га севооборотной площади N54P17K7 наблюдали максимальные в условиях наших экспериментов потери углерода. За 48 лет в этом варианте минерализовалось 13.2 т углерода органических соединений почвы/га. Это было на 4.77 т/га больше, чем в контроле. Причиной усиления процессов минерализации стало узкое соотношение С : N в почвенной среде, активизировавшее деятельность микрофлоры. В таких условиях процесс минерализации существенно преобладал над процессами гумификации, способствуя интенсивному разложению растительных остатков и гумуса.

Внесение навоза 40 т/га в 1-й ротации способствовало снижению потерь углерода в 2 раза по сравнению контролем уже к концу 2-й ротации.

Уменьшение его дозы во 2–5-й ротациях привело к повышенной минерализации углерода. Его ежегодные потери были больше по сравнению с контролем и составили соответственно в 3-й ротации 0.35, в 4-й – 0.20, а в 5-й – 0.31 т/га/год. В 6-й и последующих ротациях, когда навоз уже не вносили, наблюдали стабилизацию содержания углерода в почве. Из этого можно сделать вывод, что внесение очень низких доз навоза (20 т/га) за ротацию стимулировало микробиологическую активность и разложение органического вещества в почве.

Содержание общего азота в слое 0–40 см в начале опыта составляло в среднем 0.23%. Через 12 лет, к концу 2-й ротации, его запасы в неудобренном контроле в верхнем слое снизились на 1.12 т/га, что соответствовало ежегодным потерям в размере 0.01 т/га [14]. На удобренных участках потери азота в слое 0–20 см мало отличались от контроля (0.01–0.02 т/га/год). Самыми низкими они были при внесении навоза (0.01 т/га/год).

В вариантах применения N15P13K8 и N32P16K7, а также в контроле к концу 8-й ротации потери азота резко возросли (до 0.02 т/га/год). Внесение удобрений N38P13K8 привело к накоплению в почве остаточных азотистых веществ.

В результате снижение запасов азота в верхнем слое 0–20 см почвы в этом варианте замедлилось по сравнению с контролем. Максимальная доза (N54) снизила интенсивность потерь в последние 2 ротации до 0.008 т/га/год. Однако общие потери оказались больше по сравнению с вариантом N38 на 142 кг/га. Высокая аккумуляция азота в органическом удобрении и его длительное последствие стабилизировало потери азота на достаточно низком уровне (0.007 т/га/год), в результате чего в этом случае его было утрачено 0.864 т/га за 48 лет. Таким образом, за весь период наблюдения во всех разноудобренных вариантах наблюдали потери валового азота. Применение N38, а также навоза минимизировали потери азота во всех ротациях севооборота.

Важным генетическим показателем, характеризующим степень обогащенности гумуса азотом и характер минерализации органического вещества, является соотношение углерода к азоту. В начале опыта этот показатель во всех вариантах менялся в пределах 10.8–11.2, что свидетельствовало о благоприятных условиях минерализации органического вещества в почве. Затем произошло сужение соотношения C : N до 10.6–11.0 в слое 0–40 см почвы. Это было связано с более интенсивными потерями углерода по сравнению с азотом. По мере стабилизации запасов углерода к концу 8-й ротации и возрастания интенсивности потерь валового азота произошло расширение соотношения до 11.3–11.5. Исключения составили варианты применения N54P17K7 и навоза, где рассматриваемый показатель сохранился на исходном уровне (10.8–10.6).

Изучение фракционного состава азота показало, что при максимальных его потерях в вариантах без применения удобрений, с минимальной и максимальной дозами минерального азота происходило значительное нарушение структуры фонда азотистых соединений. Содержание фракции, в которой депонируется основная часть азота, снижалась в варианте N54P17K7 и в контроле на 145–146 мг/кг, в варианте N15P13K8 – на 57.4 мг/кг. В то же время отмечено сокращение ближайшего резерва минерального азота – легкогидролизуемой фракции – от 18.8 (N54P17K7) до 59.3 мг/кг (контроль). Оптимальным вариантом оказалось внесение N38P13K8. В этом варианте максимально сохранился уровень депонирования азота. Потери составили всего 11.5 мг/кг. Незначительными были потери легкогидролизуемой фракции (–2.00 мг/кг) при сохранении ее оптимальной доли в составе общего азота (8.3%).

Сопоставление данных баланса фосфора и количества доступных фосфатов в начале и конце

ротации позволили определить расход P_2O_5 удобрений (кг/га) на повышение в почве содержания подвижных фосфатов на 1 мг/кг. Установлено, что в 1-й ротации севооборота на повышение в почве количества доступного для растений фосфора на 1 мг/кг потребовалось 11.2 кг P_2O_5 удобрений/га. В 8-й ротации этот показатель составил 5.4–7.1 кг P_2O_5 удобрений/га. Это было обусловлено накоплением подвижных фосфатов в почве в результате систематического применения фосфорных удобрений. Следует также отметить, что показатель расхода P_2O_5 удобрений на накопление в почве 1 мг/кг доступных для растений фосфатов мало зависел как от доз, так и периодичности внесения фосфора в почву [15].

Изменения в содержании доступных для растений фосфатов чернозема южного зависят не только от потребления фосфора культурами севооборота, но и характера поглощения растворимых фосфатов почвой. Наблюдения показали, что за период от закладки стационарного опыта до 3-й ротации систематическое применение минеральных удобрений в варианте 11а не повлияло на содержание рыхлосвязанных фосфатов (1-ю фракцию определяли по методу Чанга–Джексона). Зато в удобренной почве незначительно снизилось количество алюмофосфатов (2-я фракция) и железифосфатов (3-я фракция). Сумма минеральных фосфатов в этой ротации под влиянием удобрений практически не изменилась.

Начиная с 4-й ротации в почве стационарного опыта отмечено снижение содержания всех фракций минеральных фосфатов, а их суммарное количество уменьшилось в варианте 1 на 35, в варианте 11а – на 19% по отношению к исходному содержанию. В последующий период (5–8-я ротации) суммарное содержание минеральных фосфатов находилось практически на одном уровне, но при этом менялся их фракционный состав. В первую очередь происходило увеличение фосфатов 2-й и 3-й фракций.

За период наблюдений установлено, что суммарное содержание активных минеральных фосфатов, определяемых по Чангу–Джексоу, в вариантах изменилось незначительно, различия между вариантами не превышали 7.5%. Но что касается отдельных фракций, то здесь произошли некоторые изменения. Прежде всего, под влиянием минеральных удобрений, внесенных в средних (N32P16K7, N38P13K8) и повышенных (N54P17K7) дозах резко возросли (на 36–54% больше, чем в неудобренной почве) запасы фосфатов 2-й группы. Известно, что в эту фракцию

входят алюмофосфаты и кислые фосфаты кальция и магния, являющиеся ближайшим резервом фосфора для питания растений.

Что касается минимальной системы удобрений N15P13K8, то периодическое внесение в почву небольших доз фосфора в среднем за 8 ротаций не повлияло на содержание как общей суммы минеральных фосфатов, так и на их отдельных фракций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Длительное изучение действия минеральных удобрений в условиях стационарного опыта на южном черноземе Поволжья позволило установить, что продуктивность 6-польного севооборота без внесения удобрений снизилась за 8 ротаций на 43% (с 2.76 до 1.55 т з.е./га зерновых единиц в среднем за ротацию). В среднем за изученный период наиболее эффективным оказалось внесение на 1 га севооборотной площади дозы N32P16K7 (среднегодовая прибавка составила 0.64 т/га при окупаемости 1 кг действующих веществ удобрений 11.7 кг з.е.). Выявлено также, что урожайность сельскохозяйственных культур и продуктивность севооборота в целом зависели от погодных условий вегетационного периода, вида и дозы внесенных удобрений. Эти же факторы оказывали большое влияние на накопление белка в зерне.

За время проведения опыта изменялась отзывчивость культур севооборота на виды удобрений. Например, в 1-й и 2-й ротациях достаточно высокие показатели окупаемости урожаем имели как азотные, так и фосфорные удобрения. В последующих ротациях азот имел преимущество перед фосфором, и это позволило снизить дозу фосфора до P6.6 и на его фоне применять только азотные удобрения.

Удобрения увеличивали вынос из почвы питательных веществ, и этот процесс усиливался при улучшении условий увлажнения вегетационного периода. Максимальную продуктивность севооборота в зоне южных черноземов Поволжья обеспечил баланс питательных веществ с уровнем возврата азота 99.7, фосфора – 83.0, калия – 18.3%.

Потери углерода из неудобренной почвы за 8 ротаций в слое 0–40 см составили 0.17% или 8.45 т/га. Минеральные удобрения в дозах N32P16K7 и N38P13K8 снизили потери углерода на 20–22%.

Потери валового азота за изученный период в неудобренной почве (слой 0–40 см) составили 1.12 т/га. Минимальными (0.864 т/га) они были в

варианте N38P13K8. При этом отмечено, что подавляющая часть потерь азота (85% от его общего количества) приходилась на негидролизуюмую фракцию. Именно это могло служить причиной снижения эффективного плодородия.

Отмеченные в течение всего периода наблюдений изменения содержания валового фосфора в слое 0–40 см были несущественными (коэффициент вариации = 7.1%). Минеральные удобрения не оказали существенного влияния на содержание суммы минеральных фосфатов, определенных по методу Чанга–Джексона, но они увеличили на 36–54% количество фосфатов 2-й группы (кальцийфосфаты), которые являются ближайшим резервом фосфорного питания растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пронько В.В. Факторы, усиливающие действие удобрений в засушливых условиях // Вестн. РАСХН. 2004. № 6. С. 33–34.
2. Пронько В.В., Гришин П.Н. Состояние и пути регулирования плодородия черноземных и каштановых почв Саратовской области // Аграрн. научн. журн. 2005. № 3. С. 28–31.
3. Панников В.Д., Минеев В.Г. Почва, климат, удобрения и урожай. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
4. Левицкая Н.Г., Шаталова О.В. Современные тенденции изменения климата и их влияние на продуктивность сельскохозяйственных культур в Нижнем Поволжье / Проблемы и пути преодоления засухи в Поволжье: научн. тр. РАСХН. Ч. 2. Саратов, 2000. С. 33–47.
5. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (5-е изд., перераб. и доп.). М.: Агропромиздат, 1985. 416 с.
6. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
7. Чуб М.П., Потатурина Н.В., Пронько В.В., Сайфулина Л.Б., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф. Плодородие чернозема южного и продуктивность зернопарового севооборота при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2010. № 7. С. 3–13.
8. Чуб М.П., Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю., Сычев В.Г., Лошаков В.Г., Романенков В.А. Эффективность длительного применения удобрений в агроценозах степной зоны Саратовского Поволжья в условиях аридного климата / Бюл. Геосети ВНИИА. Вып. 15. М.: ВНИИА, 2014. 55 с.
9. Сычев В.Г., Лошаков В.Г., Романенков В.А., Беличенко М.В., Чуб М.П., Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю. Плодородие черноземов засушливого Поволжья и продуктивность полевых культур при длительном применении минеральных удобрений / Бюл. Геосети ВНИИА. Вып. 26. М.: ВНИИА, 2017. 48 с.
10. Федосеев А.П. Погода и эффективность удобрений. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 144 с.
11. Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю. Влияние минеральных удобрений и

- погодных условий на вынос элементов питания зерновыми культурами в степи Поволжья // Плодородие. 2020. № 2 (113). С. 17–20.
12. Пронько В.В., Корсак В.В., Дружкин А.Ф. Влияние погодных условий и агротехнических приемов на эффективность удобрений в степном Поволжье // Агрохимия. 2004. № 8. С. 20–25.
 13. Сайфуллина Л.Б., Чуб М.П., Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю. Изменение содержания общего углерода и азота в черноземе южном при длительном применении удобрений // Плодородие. 2016. № 4. С. 19–23.
 14. Чуб М.П., Потатурина Н.В., Пронько В.В., Сайфуллина Л.Б. Влияние применения удобрений на азотный режим южного чернозема засушливого Поволжья // Агрохимия. 2005. № 10. С. 5–12.
 15. Чуб М.П., Потатурина Н.В., Пронько В.В., Бажан Г.Н. Эффективность и баланс фосфора в зернопаровом севообороте на черноземе южном при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2004. № 11. С. 18–26.

Study of the Long-Term Effect of Mineral Fertilizers in a Stationary Experiment in the Steppe Volga Region

V. V. Pronko^{a, #}, D. Y. Zhuravlev^b, T. M. Yaroshenko^b, and N. F. Klimova^b

^a*Scientific and Production Association “The Power of Life”
Bolshaya Sadovaya ul. 239, Saratov 410005, Russia*

^b*Federal Agrarian Scientific Center of the South-East
ul. Tulaykova 7, Saratov 410010, Russia*

[#]*E-mail: victor-pronko@mail.ru*

The analysis of the results obtained over 48 years in a long stationary experiment with fertilizers, which is located in the Saratov region (Russia) on the southern heavy loam chernozem, is presented. The influence of various types and doses of mineral fertilizers on the productivity of 6-field crop rotation, yield and grain quality of cultivated crops (winter and spring wheat, millet, barley, oats) has been studied. The optimal doses of fertilizers for the arid steppe of the Volga region have been identified, providing maximum yield increases and the greatest payback of 1 kg of mineral fertilizers. The influence of the conditions of humidification of the growing season on the yield of grain crops, the accumulation of protein in the grain and the removal of nutrients from the soil is shown. The scales of carbon losses, gross nitrogen and phosphorus reserves have been established both in untreated soil and with the systematic application of various doses of mineral fertilizers over 48 years of observations.

Key words: southern chernozem, long-term stationary experience, mineral fertilizers, crop rotation productivity, fertilizer payback, steppe Volga region.