

Динамика показателей плодородия и продуктивность чернозёма обыкновенного в последствии длительного применения минеральных удобрений в условиях Центрального Предкавказья

Н.Н. Шаповалова, н.с., ФГБНУ Северо-Кавказский ФНАЦ

Сельское хозяйство является основополагающей отраслью экономики Ставропольского края, но ведётся оно в сложных условиях как из-за финансового состояния предприятий, так и бесконтрольного использования земельных ресурсов. В настоящее время различными видами эрозии разрушено 31,6% сельскохозяйственных угодий, в том числе 25,7% пашни и 40,9% пастбищ. Уменьшение объёмов применения органических удобрений с 12–14 до 3,7–6,5 млн т, существенное сокращение площади кормовых культур и расширение площади чистых паров привело к увеличению ежегодного дефицита гумуса на чернозёмах – около 400 кг/га, а в зерновых севооборотах и более 1 т. Интенсивная дегумификация вызвала снижение среднего содержания гумуса в почвах пашни с 2,82 до 2,69%, площадь пашни с низким его содержанием составила 88,6% [1]. Земледелие края ведётся с отрицательным балансом питательных веществ, который составляет в среднем по азоту 42–48, фосфору – 10–11 и калию – 20 кг/га. Развитие сельского хозяйства, повышение его эффективности тесно связано с интенсификацией отрасли и в первую очередь с применением удобрений. Это один из путей увеличения урожайности возделываемых культур, сохранения и расширенного воспроизводства почвенного плодородия. Стратегия развития агропромышленного комплекса страны, направленная на рост валовой продукции растениеводства, способствовала увеличению количества применяемых в крае минеральных удобрений с 41,9 (2000 г.) до 263,0 тыс. т д.в. (2018 г.). Однако это в 1,6 раза меньше объёма, рекомендованного научно-исследовательскими учреждениями для обеспечения устойчивого роста аграрной отрасли и поддержания существующего уровня плодородия почв [1]. Таким образом, в современном земледелии формирование урожая культур нередко происходит за счёт расходования почвенных резервов элементов питания как природных, так и накопленных в результате внесения высоких доз удобрений в период интенсивной химизации. Это вызывает необходимость постоянного мониторинга плодородия почв в целях предотвращения их дальнейшей деградации.

По мнению В.Г. Минеева (1999), объективно оценить роль удобрений в улучшении плодородия почвы и повышении продуктивности севооборотов можно лишь в длительных опытах, в которых отдельные варианты заметно отличаются по харак-

теру протекающих в них процессов [2]. Поэтому исследования, проведённые в опыте, в котором в течение пяти ротаций севооборота (30 лет) применялись разные виды и дозы минеральных удобрений, а на протяжении последних 11 лет изучается эффективность накопленных в почве питательных элементов, имеют важное практическое значение.

Цель исследования – изучить влияние длительного систематического применения и последствие минеральных удобрений на плодородие чернозёма обыкновенного и среднегодовую продуктивность полевого севооборота в условиях неустойчивого увлажнения Центрального Предкавказья.

Материал и методы исследования. Исследования выполнены в опыте, заложенном в 1975 г. и включённым в Географическую сеть опытов с удобрениями и другими агрохимическими средствами. Значительная часть площади Ставропольского края (38%), занятая чернозёмными почвами, относится к территории Центрального Предкавказья с неустойчивыми условиями увлажнения и годовой суммарной радиацией свыше 100 ккал/см². Среднегодовое количество осадков в зоне распространения чернозёмных почв составляет 559 мм, гидротермический коэффициент – 1,0–1,09.

Почва опытного участка – чернозём обыкновенный мощный малогумусный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках. Обеспеченность слоя 0–20 см подвижным фосфором и обменным калием низкая (12,9 и 184 мг/кг по Мачигину), содержание гумуса – среднее (4,30% по Тюрину), реакция среды – слабощелочная ($pH_{\text{водн.}} = 7,3$ по ГОСТу 26423-85).

Схема опыта предусматривала внесение разных видов простых удобрений в возрастающих дозах как отдельно, так и на фоне двух других элементов питания – по 120 кг/га д.в. каждого. Удобрения применялись ежегодно перед посевом культуры в течение пяти ротаций шестипольного севооборота, исключая паровые поля и три года перестроечного периода со сложной экономической ситуацией. Калийное удобрение вносилось только в течение первых трёх ротаций севооборота. Таким образом, с 1975–1977 по 2005–2007 гг. в опыте было проведено 21-кратное наложение азотного и фосфорного и 15-кратное калийного удобрений. По вариантам опыта суммарно было внесено 630–3780 кг/га азота, 630–3780 кг/га фосфора и 450–2700 кг/га калия. В качестве удобрений использовались аммиачная селитра, суперфосфат и 40-процентная калийная

соль. С 2006–2008 гг. применение удобрений в опыте было прекращено. В 2016 и 2018 гг. получены данные по продуктивности озимой пшеницы после гороха в одиннадцатый год последействия.

Эффективность удобрений изучали в шестипольном севообороте, который в течение первых трёх ротаций имел следующее чередование культур: 1. Чистый пар; 2. Озимая пшеница; 3. Озимая пшеница; 4. Кукуруза на силос; 5. Озимая пшеница; 6. Овёс (яровой ячмень). В период последействия удобрений культуры чередовались следующим образом: 1. Чистый пар; 2. Озимая пшеница; 3. Озимый ячмень; 4. Соя; 5. Яровой ячмень; 6. Лён; 7. Озимая пшеница; 8. Чистый пар; 9. Озимая пшеница; 10. Горох; 11. Озимая пшеница. Опыт изначально проводился на трёх полях, последовательно закладываемых во времени с интервалом в один год. К началу изучения последействия в опыте сохранились лишь две временные повторности. Площадь опытной делянки составляет 75 м², уборочная площадь – 22 м². Повторность вариантов на каждом поле – четырёхкратная.

Отбор почвенных образцов проводился ежегодно перед внесением удобрений и посевом культуры из слоя 0–20 см. Для лабораторного анализа проб почвы использовали потенциометрический метод (рН), метод мокрого сжигания по И.В. Тюрину (гумус, подвижный гумус), вытяжку 1%-ного раствора углекислого аммония по Мачигину (подвижный фосфор). Учёт урожая осуществляли с помощью малогабаритного комбайна «Сампо-130». Статистическая обработка данных выполнена с использованием пакета программ Statistica 10.0.

Результаты исследования. Систематическое внесение разных видов и доз минеральных удобрений в течение пяти ротаций севооборота (30 лет) оказало существенное влияние на состояние плодородия чернозёма обыкновенного. Прежде всего отмечено подкисление почвенного раствора. По окончании пятой ротации севооборота почва на всех вариантах опыта, включая контроль без применения удобрений, из слабощелочной (исходное рН=7,3) перешла в категорию с нейтральной реакцией среды (рН=6,53–7,03). Значения рН водной суспензии снизились на 0,27–0,77 относительно исходного уровня и 0,11–0,50 ед. относительно контроля (рН=7,03). В наибольшей степени активная кислотность почвы увеличилась (на 0,39–0,50 ед. рН) при внесении высоких доз азота (90–150 кг/га) как в отдельности, так и в составе полного минерального удобрения. Изменение реакции среды наблюдалось не только в пахотном, но и в нижних слоях почвы до глубины 60 см [3]. По окончании 11 лет последействия значения рН на всех вариантах опыта вне зависимости от вида и дозы удобрения были на 0,39–0,67 ед. ниже уровня контроля с рН=7,06. Исключение составил вариант с применением одного азотного удобрения в минимальной дозе – 30 кг/га д.в.

На этом варианте как в период действия, так и последействия удобрений достоверных различий с неудобренным контролем в реакции почвенного раствора не выявлено, что свидетельствует о слабом отрицательном воздействии на почву низкой дозы азотного удобрения.

Сельскохозяйственное использование чернозёма в течение 41 года без удобрений привело к снижению количества гумуса в слое почвы 0–20 см на 1,03% абс., или 24% относительно исходного содержания (табл. 1). Средняя скорость убыли в период действия удобрений (30 лет) составила 0,031% абс., в последействии (11 лет) – 0,010%, что хорошо согласуется с данными других исследований [4]. Одной из причин уменьшения среднегодовой потери гумуса на контроле в период изучения последействия удобрений является более короткий срок наблюдений, а также увеличение продуктивности севооборота в связи с изменением погодных-климатических условий возделывания культур и использованием сортов с более высоким потенциалом урожайности.

Влияние минеральных удобрений на содержание гумуса в почве изучалось многими исследователями, но полученные результаты не однозначны. Это связано как с различием в свойствах самих почв, так и с разной химической нагрузкой, обусловленной видом, дозой и длительностью внесения удобрений [5]. По результатам наших исследований установлено, что систематическое внесение минеральных удобрений полностью не исключает, но заметно уменьшает потери гумуса в чернозёме обыкновенном в сравнении с неудобренным контролем. По положительному влиянию, оказываемому на гумус почвы, удобрения расположились в следующем убывающем порядке: фосфорное, фосфорное на фоне НК, азотное. По окончании пятой ротации севооборота содержание гумуса при внесении P_{90–150} было выше контроля на 10,4–13,6%; P_{30–150} на фоне N₁₂₀K₁₂₀ – на 11,2–13,6%, а при использовании N_{30–60} – лишь на 6,8–7,4%. Через 11 лет последействия удобрений этим показателям соответствовали следующие значения: 17,4–18,3; 11,3–15,0 и 6,2%. При этом в период ежегодного внесения удобрений (первая и пятая ротации) наибольшие потери гумуса отмечены при использовании высокой дозы азота – N₁₅₀, а наименьшие – фосфора (P_{90–150}). По окончании 11 лет последействия в сравнении с его началом разность в содержании гумуса на контроле и на вариантах отдельного применения фосфора увеличилась с 0,15–0,46 до 0,57–0,60% абс., что связано с качественным составом гумуса.

После 11 лет последействия удобрений количество подвижных гумусовых веществ (фракция I по И.В. Тюрину) в вариантах опыта составило 11,0–18,4% от общего содержания гумуса в почве. Наиболее низким содержанием подвижного гумуса было в контроле (11,0%), самым высоким – в вариантах с внесением 90–150 кг/га азота –

18,0–18,4%. При этом разность между вариантами N_{90–150} и контролем в количестве подвижного гумуса (0,27–0,28% абс.) превысила разность в количестве общего гумуса (0,20–0,23% абс.). Это свидетельствует о снижении природного уровня содержания устойчивых, связанных с кальцием, соединений гумуса под влиянием повышенных доз азотного удобрения, выщелачивании кальция и развитии деградационных процессов в почве.

Длительное внесение фосфорного удобрения (суперфосфата), напротив, увеличило в составе гумуса количество как подвижных, так и устойчивых к минерализации гумусовых веществ, связанных с кальцием. Это способствовало ослаблению процесса дегумификации почвы и сохранению общего содержания гумуса на наиболее высоком уровне – 3,84–3,87%.

В силу малой доступности растениям природных запасов фосфора в почвах с высокой насыщенностью кальцием и магнием уровень обеспеченности подвижными соединениями этого элемента является одним из основных показателей эффективного плодородия чернозёма обыкновенного. Единственным источником пополнения запасов фосфора в почве являются фосфорсодержащие удобрения. Наблюдения за динамикой содержания подвижного фосфора в пахотном слое почвы показали, что максимум в накоплении P₂O₅ достигнут уже по окончании второй ротации севооборота после 10-кратного внесения фосфорного удобрения (табл. 2). Значение этого максимума различалось в зависимости от дозы удобрения. Так, при систематическом внесении 30 кг/га P₂O₅ он составил 48–50 мг/кг, при 150 кг/га – 90 мг/кг. Дальнейшее внесение фосфорного удобрения (в третьей – пятой ротациях) привело к увеличению его количества в других менее доступных группах соединений и повышению запасов подвижного фосфора в нижних слоях метрового профиля почвы [6–8].

К началу изучения последствий (по окончании пятой ротации) содержание остаточного фосфора в слое 0–20 см превысило контроль в 2,1–5,1 раза,

что соответствовало повышенной и очень высокой степени обеспеченности по Мачигину. Через 11 лет последствия фосфорного удобрения отмечено снижение уровня содержания P₂O₅ в вариантах с применением одного фосфора – на 13–30 мг/кг (19,4–35,7%) и на фоне N₁₂₀K₁₂₀ – на 14–31 мг/кг (37,8–45,5%). При этом с увеличением степени обеспеченности почвы подвижным фосфором скорость снижения его содержания возрастала. Так, при повышенном уровне содержания P₂O₅ (42 мг/кг) в течение 11 лет последствия было использовано растениями 15 мг/кг, а при очень высоком уровне (91 мг/кг) – 30 мг/кг, или в 2 раза больше. При внесении фосфорного удобрения на фоне N₁₂₀K₁₂₀ скорость снижения плодородности почвы фосфатами была выше, чем при использовании фосфора в отдельности, что, как видно по данным таблицы 3, напрямую связано с выносом элемента урожаем культур.

После 11 лет последствий удобрений разность в содержании фосфора в контроле и вариантах с внесением минимальной дозы P₃₀ как отдельно, так и на фоне N₁₂₀K₁₂₀ оказалась незначительной, что может свидетельствовать об окончании эффекта последствий. На вариантах применения фосфорного удобрения в высоких дозах (90–150 кг/га д.в.) последствия будет продолжаться до тех пор, пока содержание подвижного фосфора также не снизится до уровня контроля. За весь период проведения опыта (41 год) использование фосфора удобрениями культурами было невысоким и находилось в пределах 8,7–39,9%. По истечении 30 лет действия и 11 лет последствий максимальная отдача от удобрений достигнута при внесении 30 кг/га фосфора на высоком азотно-калийном фоне (39,9%), минимальная – при использовании 150 кг/га P₂O₅ (8,7–10,6%).

Основным показателем эффективности удобрений является продуктивность севооборота. В первой, второй и третьей ротациях несмотря на увеличение кратности наложения удобрений среднегодовая продуктивность в каждом из вари-

1. Изменение содержания гумуса в слое почвы 0–20 см за пять ротаций севооборота с внесением удобрений и 11 лет последствий (исходный гумус – 4,3%)

Вариант	По окончании 5-й ротации		Через 11 лет последствий				
	общий гумус		общий гумус		подвижный гумус		
	%	± к контролю	%	± к контролю	%	± к контролю	% к общему
Контроль	3,38		3,27		0,36	–	11,0
N ₃₀	3,63	0,25	3,56	0,29	0,52	0,16	14,6
N ₉₀	3,61	0,23	3,47	0,20	0,64	0,28	18,4
N ₁₅₀	3,48	0,10	3,50	0,23	0,63	0,27	18,0
P ₃₀	3,53	0,15	3,84	0,57	0,55	0,19	14,3
P ₉₀	3,73	0,35	3,87	0,60	0,59	0,23	15,2
P ₁₅₀	3,84	0,46	3,87	0,60	0,61	0,25	15,8
P ₃₀ +N ₁₂₀ K ₁₂₀	3,84	0,46	3,71	0,44	0,46	0,10	12,4
P ₉₀ +N ₁₂₀ K ₁₂₀	3,76	0,38	3,64	0,37	0,52	0,16	14,3
P ₁₅₀ +N ₁₂₀ K ₁₂₀	3,82	0,44	3,76	0,49	0,58	0,22	15,4
HCP ₀₅		0,19		0,19			

антов опыта различалась незначительно (табл. 3). В четвёртой и пятой ротациях в результате сложившейся в 1990-е гг. сложной экономической ситуации сбор зерновых единиц с 1 га севооборотной площади в среднем по всем видам и дозам удобрений снизился на 28–31%. За всё время проведения опыта самая высокая продуктивность 1 га пашни отмечена при изучении последствий удобрений – 3,20–3,70 тыс. з. ед/га. Это связано с приоритетной ролью плодородия почвы в формировании высокого урожая культур, а также с использованием новых интенсивных сортов культур и строгим соблюдением технологий возделывания. В течение всего периода исследований наиболее высокий среднегодовой прирост продуктивности достигнут при внесении полного минерального удобрения ($N_{120}P_{30-150}K_{120}$). Далее в порядке убывания следуют фосфорное и азотное удобрения. При этом сравнение среднегодовой продуктивности севооборота на контроле в первой ротации и в период последствий (2,77 и 2,83 тыс. з. ед/га) показало, что за 41 год сельскохозяйственного использования чернозёма обыкновенного без применения удобрений его естественное плодородие осталось практически на прежнем уровне.

Доля удобрений в урожае культур в вариантах применения полного минерального удобрения ($N_{120}P_{30-150}K_{120}$) как в период их действия, так и последствия была практически равной – 18,8–22,5 и 21,2–23,5% соответственно. В вариантах с внесением одного фосфора участие остаточных фосфатов в формировании урожайности культур в период последствий было на 3,1–5,7% выше, чем при прямом действии. А вот доля азотного удобрения в период их последствий превзошла прямое действие на 10,8–15,1%, или в 3,9–14,5 раза. На основании результатов агрохимического состояния почвы можно заключить, что высокий агрономический эффект от последствий азотного удобрения, особенно при ежегодном его внесении в высоких дозах (90–150 кг/га д.в.), обусловлен увеличением количества активных соединений гумуса (основного источника питания растений) за счёт сокращения устойчивой его части, связанной с кальцием, или её потенциального плодородия. Впоследствии это может привести к резкому падению продуктивности почвы в результате снижения её плодородия до уровня, характеризующего невозможность восстановления утраченных ею природных свойств. Для уменьшения деградационных

2. Динамика содержания подвижного фосфора в слое почвы 0–20 см за время проведения опыта (исходное содержание P_2O_5 – 13 мг/кг)

Вариант	Содержание P_2O_5 , мг/кг				через 11 лет последствия	Вынос P_2O_5 удобрений урожаем, кг/га	Использование P_2O_5 , %
	ротация*						
	1-я	2-я	3-я	5-я			
Контроль	17	23	20	18	18	0	0
N_{30}	17	24	23	21	18	0	0
N_{90}	19	23	22	23	22	0	0
N_{150}	21	23	23	24	23	0	0
P_{30}	34	50	43	42	27	152	24,2
P_{90}	46	71	69	67	54	209	11,0
P_{150}	63	90	82	91	61	273	8,7
$P_{30}+N_{120}K_{120}$	25	48	40	37	23	252	39,9
$P_{90}+N_{120}K_{120}$	40	70	64	66	36	322	17,0
$P_{150}+N_{120}K_{120}$	55	90	77	79	48	333	10,6
HCP_{05}				10	12		

Примечание: * действие удобрений

3. Среднегодовая продуктивность севооборота за 30 лет действия и 11 лет последствий удобрений, тыс. зерн. ед/га

Вариант	Среднегодовая продуктивность						Средний прирост продуктивности		Доля удобрений в урожае, %	
	ротация					послед- действие	Д*	ПД*	Д*	ПД*
	1-я	2-я	3-я	4-я	5-я					
Контроль	2,77	2,67	2,63	1,98	1,82	2,83				
N_{30}	2,83	2,65	2,75	1,94	1,76	3,20	0,02	0,37	0,8	11,6
N_{90}	2,90	2,76	2,79	2,12	1,82	3,42	0,11	0,59	4,4	17,3
N_{150}	2,96	2,74	2,83	2,16	1,84	3,55	0,13	0,72	5,2	20,3
P_{30}	3,07	2,97	2,94	2,03	2,01	3,31	0,23	0,48	8,8	14,5
P_{90}	3,23	3,11	3,00	2,13	2,21	3,39	0,36	0,56	13,2	16,5
P_{150}	3,32	3,20	3,00	2,32	2,29	3,50	0,45	0,67	16,0	19,1
$P_{30}+N_{120}K_{120}$	3,43	3,16	3,30	2,35	2,29	3,59	0,55	0,76	18,8	21,2
$P_{90}+N_{120}K_{120}$	3,52	3,38	3,51	2,47	2,43	3,60	0,69	0,77	22,5	21,4
$P_{150}+N_{120}K_{120}$	3,57	3,21	3,44	2,49	2,42	3,70	0,66	0,87	21,8	23,5

Примечание: * за пять ротаций действия удобрений (Д) и за 11 лет последствий (ПД)

процессов в почве необходимо сбалансированное применение элементов минерального питания и сохранение кальциевого равновесия в почве.

Выводы. Оптимизация пищевого режима обыкновенного чернозёма Центрального Предкавказья с помощью минеральных удобрений является необходимым условием увеличения валовых сборов зерна и поддержания плодородия на более высоком уровне, чем на неудобренной пашни. Важная роль в повышении урожайности культур и сохранении плодородия почвы принадлежит фосфорным удобрениям, применение которых в наибольшей степени предотвращает потери гумуса в почве и позволяет получить устойчивый среднегодовой прирост продуктивности севооборота как в прямом действии, так и в последствии – 0,23–0,67 т/га. Максимального прироста продуктивности севооборота можно достичь лишь при совместном внесении фосфорного, азотного и калийного удобрений ($N_{120}P_{30-150}K_{120}$) – 0,55–0,87 т/га. Систематическое внесение фосфорного удобрения создаёт значительные запасы остаточных фосфатов, которые длительное время сохраняются в пахотном слое почвы в доступном состоянии. В период последствия удобрений коэффициент использования остаточных фосфатов на вариантах применения полного минерального удобрения выше, чем при отдельном внесении фосфора.

Применение азотного удобрения, особенно в повышенной дозе, улучшая условия питания растений в прямом действии, обеспечивает длительный эффект последствия за счет уменьшения щелочности почвенного раствора и увеличения количества активных подвижных соединений гумуса. Доля азотного удобрения в формировании продуктивности культур севооборота в период последствия на 10,8–15,1%, или в 3,9–14,5 раза, выше прямого действия.

Применение минеральных удобрений в достаточном объёме и соотношении питательных

элементов недостаточно для сохранения и расширенного воспроизводства плодородия чернозёма обыкновенного. Наряду с применением удобрений необходимо выполнение комплекса других мероприятий, направленных на увеличение поступления органического углерода и азота в почву.

Литература

1. Годунова Е.И. Состояние плодородия почв Ставрополя и пути достижения их нуль-деградации в современных климатических условиях / Е.И. Годунова, Н.Н. Шаповалова, В.В. Кулинцев [и др.] // *Агрохимический вестник*. 2017. № 5. С. 7–11.
2. Минеев В.Г. Развитие фундаментальных исследований по эколого-функциональной роли агрохимии в агроценозе // *Развитие почвенно-экологических исследований*. М.: Изд-во МГУ, 1999. С. 9–20.
3. Шаповалова Н.Н, Годунова Е.И., Шустикова Е.П. Кислотно-основные свойства чернозёма обыкновенного после длительного внесения минеральных удобрений // *Плодородие*. 2016. № 4 (91). С. 15–18.
4. Шеуджен А.Х., Нешадим Н.Н., Онищенко Л.М. Органическое вещество почвы и методы его определения: учебное пособие / под ред. В.Т. Куркаева. Майкоп: ОАО «Полиграфиздат «Адыгея», 2007. 344 с.
5. Ярошенко Т.М. Длительный стационарный опыт в степном Поволжье: результаты исследований в восьмой ротации зернопарового севооборота / Т.М. Ярошенко, Н.Ф. Климова, Д.Ю. Журавлев [и др.] // *Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 гг.: матер. всерос. координац. совещ. науч. учрежд. – участников Географической сети опытов с удобрениями* / под ред. акад. В.Г. Сычева. М.: ВНИИА, 2018. С. 420–429.
6. Шустикова Е.П., Шаповалова Н.Н. Особенности формирования запасов остаточных фосфатов в чернозёме обыкновенном при длительном применении удобрений // *Плодородие*. 2011. № 1. С. 21–23.
7. Шаповалова Н.Н., Шустикова Е.П. Мониторинг плодородия чернозёма обыкновенного, сформированного под воздействием длительного применения минеральных удобрений // *Состояние и перспективы агрохимических исследований в Географической сети опытов с удобрениями: матер. междунар. науч.-методич. конф. учрежд. – участников Гео-сети России и стран СНГ, 10–11 июня 2010 г.* / под ред. В.Г. Минеева, В.Г. Сычева. М.: ВНИИА, 2010. С. 131–134.
8. Шаповалова Н.Н., Шустикова Е.П. Влияние длительного внесения фосфорных удобрений на фосфатный режим чернозёма обыкновенного при возделывании озимой пшеницы // *Закономерности изменения почв при антропогенных воздействиях и регулирование состояния и функционирования почвенного покрова: сб. науч. стат. по матер. всерос. науч. конф. (28–29 сентября 2010 г.)*. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2011. С. 262–267.